



■ POUR LA

SCIENCE

Février 2015 - n° 448

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

**MATTHIEU
RICARD**
se prête à
l'expérience



Comment la méditation modifie le cerveau

**Ses bienfaits
vus au scanner**



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

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

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

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Cerveau & Psycho • L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédacteurs en chef adjoints : Sébastien Bohler

et Bénédicte Salthun-Lassalle

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 Maillet

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 :

Évelyne Host-Platret, Bernard Marty, Sébastien Michelin,

Anne-Hélène Olivier, Lionel Pernet, Christophe Pichon.

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlascience.fr)

Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré et Nada Mellouk-Raja. Tél. : 01 55 42 84 04

Abonnement en ligne : <http://www.pourlascience.fr>

Courriel : 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

Tel : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

Magazine disponible sur 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.

Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak.

Editors : Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth

Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong.

President : Keith McAllister. 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 Ameri-

can » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la

Science S.A.R.L. ».

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

interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de

l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du

droit de copie (20 rue des Grands-Augustins -

75006 Paris).



A l'heure où nous mettons sous presse, l'équipe de *Charlie Hebdo* a subi un odieux attentat.

Pour la Science tient à exprimer sa totale solidarité et compassion, et à rappeler que les libertés de la presse et de l'expression sont des valeurs fondamentales qui ne doivent céder devant aucun fanatisme.



Méditer sous IRM

Observer le cerveau en activité est possible depuis un certain nombre d'années déjà, grâce à des techniques élaborées telles que l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ou la tomographie par émission de positrons. Même si l'interprétation des images obtenues est loin d'être aisée, de telles observations constituent un pan important des neurosciences d'aujourd'hui.

Il est ainsi crucial pour les scientifiques de déterminer comment telle ou telle activité mentale se traduit dans le cerveau – quels sont les aires et réseaux cérébraux impliqués, à quels moments ils s'activent, avec quelle intensité, etc. Des recherches récentes ont porté sur une activité mentale particulière : la méditation, pratiquée depuis des millénaires dans différentes traditions spirituelles, religieuses ou non, et dont il existe plusieurs formes.

Une confirmation des effets positifs et une fenêtre qui s'ouvre sur les mécanismes.

Comme le détaillent dans ce numéro le moine bouddhiste Matthieu Ricard et deux neurobiologistes, Antoine Lutz et Richard Davidson, des méditants débutants ou chevronnés se sont prêtés à des expériences où l'on enregistrait leur activité cérébrale (voir pages 22 à 29).

Ces travaux ont d'ores et déjà produit des résultats remarquables. Ils ont établi les schémas d'activation des aires cérébrales en fonction des divers types de méditation. Ils ont montré que la méditation conduit à des modifications dans la structure même du cerveau. Ils ont fourni des indications sur les mécanismes à l'œuvre. Et ils confirment les bienfaits que l'on attribuait à la méditation : meilleur contrôle de l'attention, meilleure gestion du stress, etc. Avec, peut-être, des perspectives cliniques et médicales. Des découvertes à lire... et à méditer !

Maurice Mashaal
rédacteur en chef

1 **Edito**

Actualités

- 4 Un débat entre Einstein et Bohr enfin tranché
- 5 Le devenir des déchets plastiques en mer
- 6 L'acier des cathédrales : squelette ou béquille ?



- 10 Le poker résolu par l'ordinateur
- 11 Les essaims d'insectes, des systèmes critiques ?

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 12 **Point de vue**
L'amélioration morale selon les transhumanistes : attention danger !

Marina Maestrutti

- 14 **Questions ouvertes**
Les nanoparticules nuisent-elles au cerveau ?

Anna Bencsik

- 18 **Lu sur SciLogs.fr**
Comment ma mère a survécu au numérique

Thierry Viéville

- 19 **Homo sapiens informaticus**
Les ordinateurs, des révolutionnaires ?

Gilles Dowek

- 20 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Pourquoi les extraterrestres n'ont-ils pas de cheveux ?

Gérald Bronner

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement
Pour la Science brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : © frikota/shutterstock.com

À LA UNE

22

NEUROSCIENCES

MÉDITATION : comment elle modifie le cerveau

Matthieu Ricard, Antoine Lutz
et Richard Davidson

Les neurosciences explorent le cerveau des méditants. Et confirment les effets bénéfiques de ces très anciennes pratiques méditatives.



30 **PHYSIQUE NUCLÉAIRE** Le noyau, entre liquide et cristal

Jean-Paul Ebran et Elias Khan

Aplati, en poire, plutôt liquide, avec un halo... : le noyau des atomes présente toute une variété de formes et d'états. Une diversité que les physiciens commencent à expliquer.

38 **ARCHÉOLOGIE** Kainua, une ville étrusque sort de terre

Martin Bentz

Mal connue, la vie quotidienne étrusque se dévoile grâce aux fouilles d'une cité abandonnée au IV^e siècle avant notre ère. Parmi les découvertes : une villa d'architecture romaine, qui a donc deux siècles d'avance...



46 **BIOPHYSIQUE****Des tourbillons
pour mieux nager***Frank Fish et George Lauder*

Poissons, dauphins ou méduses se propulsent dans l'eau avec aisance. Comment font-ils ? En visualisant les écoulements, les scientifiques révèlent les divers effets hydrodynamiques en jeu.

54 **EXOBILOGIE****Comment trouver
la vie sur Mars***Christopher McKay et Victor Parro García*

L'eau a coulé sur Mars, mais cela a-t-il suffi pour que la vie s'y développe ? Une nouvelle génération d'instruments, capables de détecter les traces les plus infimes de vie, permettra bientôt de répondre à cette question.

60 **EXOBILOGIE****Cap sur Mars
avec ExoMars et Mars2020***Sylvestre Maurice et Michel Viso*

Les missions martiennes les plus récentes ont montré que Mars a été une planète habitable. Prochain objectif : la recherche de traces d'une vie passée ou encore présente.

62 **SOCIOLOGIE****Stephen Hawking,
le mythe du génie solitaire***Hélène Mialet*

Chercheur brillant mais lourdement paralysé, le théoricien britannique est, contrairement à l'image qu'on se plaît à donner de lui, l'antithèse du savant solitaire armé de la seule puissance de son cerveau.

Rendez-vous70 **Histoire des sciences****Un teinturier du Languedoc
à la conquête du Levant***Dominique Cardon*

Un mystérieux carnet de teinturier éclaire l'importance, au XVIII^e siècle, de la maîtrise des couleurs dans la concurrence entre drapiers européens pour conquérir les marchés d'Orient.

76 **Logique & calcul****Les mathématiques de l'origami***Jean-Paul Delahaye*

L'étude mathématique de l'art du papier plié est récente et révèle des liens étroits avec l'algèbre, la théorie des nombres ou l'algorithmique.

82 **Science & fiction****Yoda, un amphibien
d'une galaxie lointaine est-il ?***J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq*84 **Art & science****Dans la tête
d'un requin-marteau***Loïc Mangin*86 **Idées de physique****Refroidir avec des aimants***Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*89 **Question aux experts****Faut-il prendre des notes
à la main ou à l'ordinateur ?***Cynthia May*91 **Science & gastronomie****L'alcool, préhispanique aussi***Hervé This*92 **À lire**96 **Bloc-notes**

Les chroniques de Didier Nordon

Aussi en numérique !**SCIENCE.fr**Archives
depuis 1996Application
Smartphone et Tablette

Suivez-nous sur les réseaux sociaux



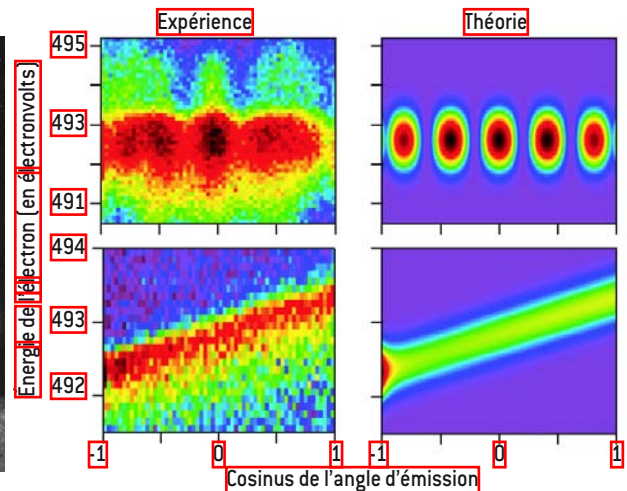
Actualités

Physique théorique

Un débat entre Bohr et Einstein enfin tranché

Une expérience de pensée d'Albert Einstein est devenue réalité au synchrotron Soleil.

Le père de la relativité voulait défier la mécanique quantique, mais le résultat lui donne tort...



Dans les années 1920, Niels Bohr et Albert Einstein ont confronté leur vision de la mécanique quantique à l'aide d'expériences de pensée. Catalin Miron et ses collègues ont conçu l'équivalent d'une de ces expériences – une version de l'expérience des fentes de Young

modifiée par Einstein – avec une molécule de dioxygène qui émet un électron. Si l'atome qui émet l'électron n'est pas identifiable, on obtient une figure d'interférence (ci-dessus, en haut). Dans le cas contraire, la figure d'interférence disparaît (ci-dessus, en bas).

Albert Einstein pensait que la mécanique quantique allait à l'encontre des principes de la physique. À partir de 1927 et durant plusieurs années, il a confronté son point de vue à celui du physicien danois Niels Bohr dans des discussions restées célèbres. Einstein a imaginé diverses expériences de pensée pour tenter de mettre en évidence des failles dans l'édifice de la physique quantique. L'un de ces tests imaginaires est une version améliorée de l'expérience classique des fentes de Young. À l'époque, les limitations techniques ne permettaient pas de la réaliser. C'est aujourd'hui chose faite. Catalin Miron, physicien au synchrotron Soleil, près de Paris, et son équipe ont réalisé une expérience analogue à celle imaginée par Einstein. Et le résultat lui donne tort!

L'une des notions les plus déroutantes de la mécanique

quantique est la dualité onde-corpuscule. Chaque objet quantique peut se comporter comme une onde et comme une particule. La lumière, par exemple, peut être vue comme une onde électromagnétique ou comme un flux de particules individualisées, les photons. En 1927, le physicien allemand Werner Heisenberg a proposé son principe d'incertitude, qui stipule qu'on ne peut connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule avec une précision supérieure à un seuil limite. Pour Bohr, ce principe d'incertitude est la manifestation d'un principe plus fondamental, celui de complémentarité: un objet quantique ne peut se comporter simultanément comme une onde et comme un corpuscule.

Dans la version initiale de l'expérience de Young, on éclaire une plaque percée de deux fentes parallèles et proches. Une onde

lumineuse passe simultanément par les deux fentes et crée une figure d'interférence (une alternance de bandes claires et sombres) sur un écran placé derrière la plaque. Mais si on envoie les photons un par un, que se passe-t-il? Sait-on par quelle fente passe chaque photon? Si cette information n'est pas connue (en l'absence de détecteur sur les fentes), on observe que l'accumulation des photons sur l'écran crée aussi une figure d'interférence. En revanche, suivant le principe de complémentarité, si l'on place un détecteur sur une fente, ce qui permet de savoir par quel chemin le photon est passé, on n'obtient plus de figure d'interférence.

Einstein, qui n'était pas convaincu par la validité du principe de complémentarité, a essayé de le mettre en défaut en reprenant l'idée de l'expérience de Young. Quand une particule

passe par une fente, elle la touche et change de direction avant d'atteindre l'écran, transmettant aux bords de la fente un peu de sa quantité de mouvement.

Einstein proposa que l'une des fentes soit mobile et rattachée à un ressort. Ce dispositif ne mesure que la quantité de mouvement transférée. Cette mesure, selon Einstein, ne perturbe pas la particule lors de son passage, comme si le détecteur était absent. Einstein avança donc que la figure d'interférence serait toujours présente. Une telle mesure était cependant irréalisable avec les moyens techniques de l'époque.

Depuis, plusieurs équipes ont monté des expériences essayant de mettre en œuvre l'idée d'Einstein. En particulier, en 2001, l'équipe française de Serge Haroche a montré qu'il est possible de manipuler des systèmes à l'échelle de l'atome. Cela a ouvert la voie à

Écologie

Le devenir des déchets plastiques en mer

Plus de 5 000 milliards de débris plastiques flottent à la surface des océans, selon une récente étude internationale, soit plus de 260 000 tonnes. Ces chiffres ne correspondraient qu'à une infime part de la pollution plastique océanique. Éclairage de François Galgani, océanographe à l'Ifremer, à Bastia, et coauteur de l'étude.

une mesure analogue à celle requise dans l'expérience d'Einstein.

C. Miron et ses collègues ont étudié un système qui est une réalisation fidèle, à l'échelle atomique, de l'idée de transfert de quantité de mouvement entre la particule et la fente suggérée par Einstein : des molécules de dioxygène (O_2) bombardées par des rayons X du synchrotron *Soleil*.

Quand un photon X frappe une molécule de dioxygène avec une énergie de 541,8 électronvolts, la molécule absorbe le photon et est excitée. En se désexcitant, elle émet un électron. Il est alors impossible de savoir lequel des deux atomes de la molécule a émis l'électron. La mesure de l'énergie de l'électron éjecté en fonction de l'angle d'émission présente des motifs d'interférence similaires à ceux de l'expérience des fentes de Young.

A contrario, lorsque l'énergie du photon X est de 539 électronvolts, la molécule se dissocie et l'un de ses deux atomes émet un électron, mais la mesure du recul de l'atome permet de déterminer duquel il s'agit. Cela revient à savoir par quelle fente la particule est passée dans l'expérience de Young. Or en faisant les mêmes mesures, on n'obtient plus d'interférences.

Ainsi, dans le cas où il est possible de déterminer la « voie de passage » par la mesure du recul (c'est-à-dire du transfert de quantité de mouvement), la figure d'interférence n'est plus visible, contrairement à ce que pensait Einstein. Le principe de complémentarité de Bohr est donc vérifié – une confirmation de plus de notre compréhension du monde quantique.

Sean Bailly

Xiao-Jing Liu et al., *Nature Photonics*, en ligne le 1^{er} décembre 2014

Qu'appORTE votre étude par rapport aux précédentes ?

François Galgani : C'est une compilation de données issues de 24 expéditions entre 2007 et 2013 à travers les cinq gyres (tourbillons) océaniques subtropicaux, aux abords de l'Australie, dans la baie du Bengale et en Méditerranée. Avec ces données, nous avons validé un modèle de transport de surface des particules plastiques et montré que les accumulations correspondent aux prévisions du modèle. C'est la première étude d'une aussi grande envergure et effectuée en fonction de la taille des débris.

Comment a été construit le modèle utilisé ?

F. G. : On est parti d'un modèle de circulation développé par la Marine américaine dans les années 1970. Le modélisateur de l'étude, Laurent Lebreton, en a extrait la partie qui concerne la couche de surface – les quelques mètres de profondeur où flottent les débris plastiques – et l'a couplée à des outils de simulation du comportement de particules dans un fluide.

L'étude a détecté moins de microplastiques – inférieurs à 4,5 micromètres – qu'attendu. Pourquoi ?

F. G. : Plusieurs pistes sont possibles. Lucy Woodall, du Muséum britannique d'histoire naturelle, et ses collègues ont récemment proposé que des microparticules couleraient au fond de la mer. Cette

idée ne fait pas l'unanimité. La plupart des microplastiques ont une faible densité et on comprend mal comment ils sédimenteraient. Autre piste : les procellariiformes, oiseaux dont l'albatros fait partie, avalent des débris, alors stockés dans une poche de l'estomac. Une espèce en mer du Nord prélève ainsi quelques dizaines de tonnes de déchets par an. Mais cela n'explique pas tout. En fait, la seule explication convaincante est liée à la dégradation des débris. Plus les particules se



François Galgani est océanographe à l'Ifremer.

fragmentent, plus le rapport surface sur poids des déchets est important. Cela augmente leur accessibilité à des bactéries qui contribuent à leur fragmentation en les digérant, ce qui accélère le processus.

Quel est l'impact des déchets plastiques marins ?

F. G. : La dégradation des microdéchets n'est pas dangereuse, car leurs constituants principaux, des polymères de propylène, éthylène, etc., sont inertes, et les quantités d'additifs toxiques libérés, infimes. Le danger chimique vient des macrodéchets, bien

plus importants en poids. Les microdéchets, plus nombreux, transportent des organismes sur de longues distances, déséquilibrant ainsi des écosystèmes ou disséminant des agents pathogènes. Après le tsunami de 2011, 120 espèces sont passées du Japon au Canada par ce biais. De plus, des espèces sont particulièrement sensibles aux déchets, et même le tourisme, la santé humaine (blessures), la pêche et la navigation sont touchés.

Observe-t-on les mêmes effets en Méditerranée ?

F. G. : En pire ! Les déchets ne peuvent pas en sortir. À Gibraltar, les eaux sont entrantes en surface et sortantes en profondeur. Or les déchets sont en surface... Des collègues slovénes ont mesuré jusqu'à cinq millions de microplastiques par kilomètre carré.

Que faire pour enrayer cette pollution ?

F. G. : C'est l'objet de la conférence internationale organisée à Monaco en mars prochain, mais déjà une directive européenne pour réduire les déchets est prévue et des gouvernements l'ont anticipée. En France, les sacs plastiques seront interdits dès 2016. L'industrie propose de favoriser le recyclage. Enfin, l'éducation jouera un rôle important : la plupart des déchets en mer sont issus de la grande consommation...

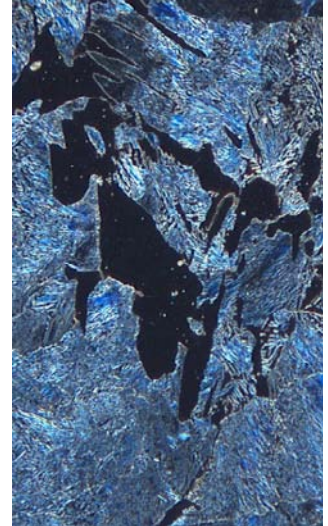
Marie-Neige Cordonnier

M. Eriksen et al., *PLoS One*, 2014

Archéologie

L'acier des cathédrales : squelette ou béquille ?

La datation des renforts métalliques de cathédrales gothiques révèle qu'ils ont parfois été prévus dès la conception.



Dans la cathédrale de Beauvais, des tirants métalliques empêchent les arcs-boutants qui soutiennent les murs du chœur de s'écarter. À droite, un fragment d'acier de la cathédrale vu au microscope (les parties bleues renferment un mélange de fer et de carbone).

Dans les années 1960, l'architecte Jean-Pierre Paquet a fait retirer les barres métalliques fixées entre les arcs-boutants (les piliers courbes soutenant les murs à l'extérieur) de la cathédrale de Beauvais. Il les trouvait inutiles et disgracieuses, et ne les pensait pas d'origine.

À l'instar de celle de Beauvais, la plupart des cathédrales gothiques intègrent des éléments en acier, tels des tirants (des barres fixées entre les piliers ou les murs pour éviter qu'ils ne s'écarterent). Ont-ils été prévus dès la conception ou bien intégrés plus tard pour renforcer la structure ? La question faisait débat. Une équipe interdisciplinaire menée par Stéphanie Leroy, du Laboratoire archéomatériaux et prévision de l'altération (LAPA, CNRS), a daté au carbone 14 les renforts métalliques des cathédrales de Beauvais et de Bourges, et montré que, pour la première, ces renforts ont été utilisés dès le début de la construction.

L'histoire des cathédrales est mouvementée. La construction de celle de Beauvais débuta en 1225 et s'est étalée sur plus d'un siècle. Du fait de la durée des travaux, des réparations successives et des

divers ajouts, il est parfois difficile de savoir quand certains éléments architecturaux ont été mis en place.

Après une analyse de la structure et de la disposition des renforts métalliques, S. Leroy et ses collègues ont effectué des microprelevements, qu'ils ont datés au carbone 14. Cet élément radioactif, dont la désintégration progressive révèle le temps écoulé depuis la mort d'un organisme, provenait du charbon de bois brûlé dans les fourneaux où le minerai avait été transformé ; une petite quantité s'était alors incorporée aux métaux.

La difficulté, selon S. Leroy et Emmanuelle Delqué-Kolic, du Laboratoire de mesure du carbone 14 (CEA / CNRS / IRD / IRSN / MCC), est que « le carbone contenu dans les métaux anciens peut provenir d'autres sources et n'est présent qu'à l'état de trace ». Grâce à une étude fine de la structure des métaux ferreux et à une préparation spécifique des échantillons, les chercheurs ont réussi à extraire des quantités infimes de carbone et à les dater de façon fiable.

L'équipe de S. Leroy a d'abord validé sa méthode avec des

éléments datés par ailleurs grâce à des sources historiques et archéologiques. Puis elle l'a appliquée aux cathédrales. Les chercheurs ont trouvé qu'à Beauvais, certains renforts métalliques dataient du début de la construction, vers 1225-1240, et auraient donc été pensés dès la conception. À Bourges, cathédrale un peu plus ancienne (le chœur remonte à 1195-1214), les renforts semblent plutôt avoir été imaginés en cours de construction pour stabiliser l'édifice inachevé.

Ainsi, pour réaliser des performances architecturales inédites, les bâtisseurs de cathédrales devaient innover et tester de nouvelles techniques de construction. Les renforts métalliques sont sans doute l'un des éléments qui ont permis à ceux de la cathédrale de Beauvais d'édifier le plus haut chœur gothique du monde (46,3 mètres). J.-P. Paquet n'a pas eu une bonne idée en les retirant : lors d'une tempête en 1989, les piliers supportant les arcs-boutants se sont mis à osciller dangereusement. Des tirants de remplacement ont alors été mis en place dans les années 1990.

Guillaume Jacquemont

S. Leroy et al., *Journal of Archaeological Science*, vol. 53, pp. 190-201, 2015

46
mètres environ

C'est la hauteur du chœur

de la cathédrale

de Beauvais, le plus

haut chœur gothique

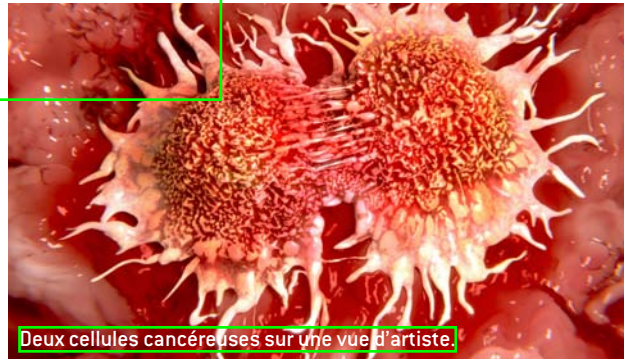
du monde.

Médecine

Cancers : la part du hasard

Pourquoi les cancers sont-ils des millions de fois plus fréquents dans certains tissus que dans d'autres ? Deux tiers de ces disparités seraient dus au hasard et seulement un tiers à l'environnement et aux prédispositions génétiques héréditaires. Telles sont les conclusions de Cristian Tomasetti, de l'Université Johns Hopkins, et Bert Vogelstein, du Centre du cancer Johns Hopkins Kimmel, aux États-Unis.

Les agents mutagènes environnementaux et l'hérédité ne suffisent pas à expliquer les disparités observées, les chercheurs ont supposé qu'elles étaient dues au hasard associé au nombre de divisions des cellules souches des tissus : chaque tissu contient un réservoir de ces cellules qui participe à son maintien. Plus elles se divisent au cours d'une vie, plus le risque qu'une mutation aléatoire survienne sur un gène impliqué dans un cancer est grand. Pour tester cette hypothèse, ils ont confronté les données sur le nombre de divisions des cellules



Deux cellules cancéreuses sur une vue d'artiste.

souches dans 31 types de tissus et les risques de survenue d'un cancer dans chacun, aux États-Unis. Ils ont ainsi montré une corrélation entre le nombre de divisions des cellules souches dans un tissu et le risque de cancer dans ce tissu. Sur les 31 cancers, 22 seraient ainsi principalement dus au hasard.

Pour Jean-Pascal Capp, de l'Institut national des sciences appliquées de Toulouse, l'interprétation est incomplète et dangereuse : « Certes, les mutations augmentent la probabilité de développer un cancer, mais rien ne prouve

qu'elles en sont le déclencheur. Des cellules de tissus sains peuvent contenir de telles mutations et avoir un comportement normal. Le cancer n'apparaît que si leur environnement cellulaire est lui aussi perturbé durant une période assez longue. Et de telles perturbations peuvent être causées par des agents non mutagènes tels que les perturbateurs endocriniens. Donc malchance oui, concernant l'apparition des mutations, mais fatalisme sûrement pas. »

M.-N. C.

Science, vol. 347, pp. 78-80, 2015

Les latéralisés plus fûtes

Chez la plupart des gens, le langage est latéralisé, c'est-à-dire traité préférentiellement dans l'un des deux hémisphères cérébraux. Emmanuel Mellet, du CNRS, et ses collègues ont montré que ceux pour qui ce n'est pas le cas (un peu plus de 10 % des sujets étudiés) ont de moins bonnes performances cognitives. La latéralisation pour le langage représenterait alors un avantage évolutif, d'où sa prédominance, et ses variations refléteraient des différences cérébrales plus globales.

Comment fuir les malades

Chez les rongeurs, les individus malades émettent des signaux olfactifs qui entraînent chez leurs congénères un comportement d'évitement. L'équipe d'Ivan Rodriguez, à l'Université de Genève, a montré que l'organe voméronasal, situé à l'extrémité intérieure du nez et spécialisé dans la détection des phéromones, joue un rôle clef dans ce phénomène. Reste à identifier les signaux olfactifs en jeu et les récepteurs correspondants.

Génétique des populations

La diversité génétique africaine enfin étudiée

La plus grande diversité génétique humaine se trouve en Afrique. Une équipe réunie autour de Deepti Gurdasani, de l'Institut Sanger de recherche en génomique, commence à en révéler les structures.

Les chercheurs ont analysé d'une part des données génotypiques (les versions de certains gènes) de 1 481 individus provenant de 18 groupes ethnolinguistiques différents à travers l'Afrique subsaharienne, et d'autre part les séquences complètes des génomes de 320 individus représentant sept groupes ethnolinguistiques de trois régions distinctes géographiquement, à

savoir l'Éthiopie (Nord-Est de l'Afrique), l'Ouganda (Est) et l'Afrique du Sud.

Les chercheurs retrouvent dans leurs données l'expansion bantoue. Cette expansion d'une population paysanne originelle vers l'Afrique forestière puis orientale et australe, il y a plus de 3 000 ans, est à l'origine des 450 langues nigéro-congolaises apparentées en Afrique.

Plus surprenant, les chercheurs ont mis en évidence un considérable flux de gènes entre l'Eurasie et l'Afrique de l'Est, qui se serait produit il y a entre 10 500 et 7 500 ans. Même chez les Bantous, ce flux génique est à

l'origine d'une part de la diversité génétique africaine bien plus importante qu'on ne le pensait.

Tout aussi intéressants sont les indices de gènes bushmen (khoisans) partout en Afrique. Le fait que l'on en trouve aussi dans le génome ouest-africain est fascinant, car il suggère que les Bushmen correspondent à la population ancienne constituant le substrat génétique de l'Afrique subsaharienne d'avant les Bantous. Au cours de leur expansion, les Bantous ont repoussé les Bushmen dans les forêts et les déserts, mais se sont aussi mélangés à eux.

François Savatier

Nature, en ligne le 2 décembre 2014



Cette foule d'Afrique du Sud est à l'image de l'Afrique : diverse. Sans doute les Bantous y dominent-ils, mais les gènes eurasiens ou ceux des Bushmen sont présents, comme l'indique l'étude récente.

Un nouvel antibiotique

Une équipe de chercheurs de *Novobiotics* (États-Unis), de l'Université de Bonn et d'autres instituts a découvert un nouvel antibiotique nommé teixobactine. Losee Ling et ses collègues l'ont obtenu après avoir développé des méthodes pour cultiver en milieu naturel des bactéries que l'on n'a jamais pu cultiver en laboratoire (c'est le cas de 99 % des espèces de bactéries). La teixobactine, repérée parmi 10 000 composés, agit en inhibant la synthèse des parois cellulaires. Elle s'est montrée efficace, sans engendrer de phénomènes de résistance.

Piège moléculaire pour gaz

Le monoxyde d'azote (NO) est connu pour ses fonctions de vasodilatateur et de microbicide (les macrophages en produisent pour éliminer des bactéries pathogènes). Ce composé serait donc idéal pour entrer dans la composition de divers médicaments. Problème : le monoxyde d'azote est gazeux. Or Christian Serre, de l'Institut Lavoisier à Versailles, et ses collègues ont conçu des pièges moléculaires de carboxylate de fer qui retiennent de grandes quantités de NO. Biodégradables et peu toxiques, ces pièges libèrent ensuite progressivement le gaz.

La Tourette chez les souris

Le syndrome de Gilles de la Tourette se manifeste par des tics moteurs et vocaux (l'utilisation involontaire de mots grossiers étant l'aspect le plus connu, mais pas le plus fréquent). On ignore les causes de cette maladie, mais une piste pourrait être la perte d'un certain type de neurones dans le striatum, une structure nerveuse sous le cortex. L'équipe de Christopher Pittenger, de l'Université Yale, a induit des lésions similaires chez des souris. Soumis à un stress, les animaux ont présenté des tics moteurs comme dans la maladie humaine. Un modèle pour mieux étudier celle-ci ?

Transports

Mieux modéliser la foule avec l'anticipation



Les mouvements de foule peuvent provoquer des accidents graves. Pour les éviter, il est nécessaire de comprendre la dynamique d'un rassemblement important de personnes, mais les modèles numériques de foules ne reproduisent pas toujours correctement les situations réelles. Stephen Guy, de l'Université du Minnesota, et deux collègues ont mis en évidence un nouvel ingrédient qui améliore les simulations : l'anticipation des collisions.

Les individus ne se comportent pas comme des particules répulsives qui se repoussent quand elles se rapprochent. En 2012, Anne-Hélène Olivier, de l'Université de Rennes, et ses collègues ont montré que deux personnes anticipent les collisions à venir et décident alors ou non

de modifier leur trajectoire en changeant de direction ou en adaptant leur vitesse de marche.

S. Guy et ses collègues ont remarqué que plus les gens marchent vite, plus ils anticipent tôt la collision. Ils ont alors montré que le facteur clé n'est pas la distance qui sépare les marcheurs, mais le temps restant avant une collision potentielle. Celui-ci est quasi constant et indépendant de la vitesse de marche.

Avec cette nouvelle règle, S. Guy et ses collègues reproduisent de nombreuses situations qui résistaient à la modélisation, par exemple celle où deux marcheurs proches l'un de l'autre vont dans la même direction.

S. B.

I. Karamouzas et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 113, 238701, 2014

Insolite

Une grenouille qui accouche de têtards

Sur l'île indonésienne de Sulawesi, Jim McGuire, de l'Université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont montré que chez les grenouilles de l'espèce *Limnonectes larvaepartus* récemment décrite, la fécondation est interne. Seules une dizaine d'espèces de grenouilles pratiquent ce mode de reproduction : elles pondent des œufs fécondés ou accouchent de grenouilles formées. Les *L. larvaepartus*, elles, donnent naissance à des têtards, ce qui est une première !



Planétologie

Rosetta : l'eau de la Terre ne viendrait pas des comètes

L'eau est omniprésente sur Terre, mais d'où vient-elle ? Lors de la formation de la planète, l'eau, substance volatile, s'est d'abord vaporisée. Elle y aurait donc été rapportée ultérieurement par des astéroïdes ou des comètes. Pour préciser quels corps ont enrichi la Terre en eau, les astrophysiciens comparent les caractéristiques des molécules d'eau de la Terre et des différentes comètes et astéroïdes. L'instrument *Rosina*, à bord de la sonde *Rosetta*, a effectué une telle mesure sur la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, surnommée Tchouri.

Les astéroïdes de la ceinture de débris située entre Mars et Jupiter contiennent, pour certains, jusqu'à 15 % d'eau sous forme de minéraux hydratés. Les

comètes, quant à elles, se sont formées dans les régions les plus lointaines du Système solaire et occupent deux réservoirs, la ceinture de Kuiper et le nuage d'Oort. Elles comportent jusqu'à 50 % de glace d'eau. Des perturbations gravitationnelles en dévient certaines de leur trajectoire et les envoient dans la partie interne du Système solaire.

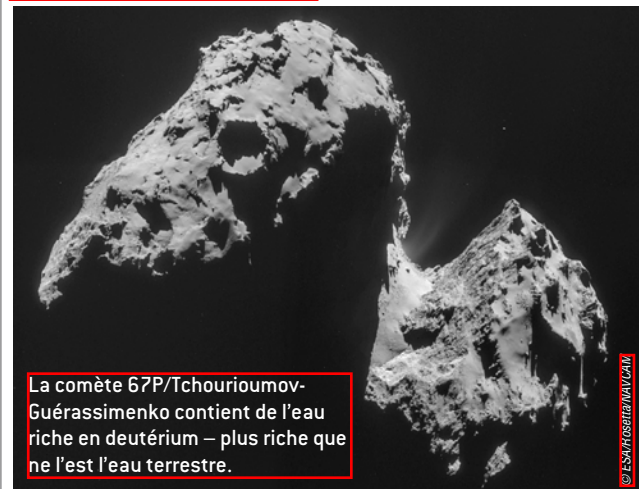
Pour tester les différentes origines possibles de l'eau terrestre, les astrophysiciens s'intéressent au deutérium, isotope de l'hydrogène qui peut constituer de l'eau lourde – une molécule d'eau dans laquelle un atome d'hydrogène (H) est remplacé par un atome de deutérium (D). Or *Rosina* a mesuré sur Tchouri un rapport isotopique D/H environ triple de celui de la Terre,

et supérieur à celui des autres comètes de la ceinture de Kuiper – une hétérogénéité qu'il reste à expliquer. Le résultat de *Rosina* renforce les scénarios selon

lesquels l'eau de la Terre proviendrait surtout des astéroïdes.

S. B.

K. Altwegg et al., *Science Express*, en ligne le 10 décembre 2014



La comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko contient de l'eau riche en deutérium – plus riche que ne l'est l'eau terrestre.

france

Dans l'interêt de la science

mathieu vidard

la tête au carré
14:05-15:00

france

intervenez

franceinter.fr

Informatique

Le poker résolu par l'ordinateur

Aux échecs, la supériorité de l'ordinateur sur l'homme est consacrée depuis 1997, et certains jeux comme les dames ont même été résolus, c'est-à-dire que l'on a pu déterminer une stratégie assurant à coup sûr la victoire.

Mais ce n'est pas le cas de tous les jeux, et notamment ceux à information incomplète, où chaque joueur dispose d'informations que les autres n'ont pas. Le poker est ainsi l'un des plus complexes à modéliser.

Michael Bowling et ses collègues de l'Université d'Alberta, au Canada, ont réussi à résoudre « au sens faible » le poker *Texas Hold'em limit* (avec des mises fixées et un nombre fini de relances) à deux joueurs, c'est-à-dire à calculer un couple de stratégies si proche de

l'optimum que les chances de faire mieux en jouant toute une vie sont statistiquement minimales. Seuls des jeux à information incomplète d'une complexité inférieure de trois ordres de grandeur avaient été résolus jusqu'ici.

Résoudre un jeu consiste à déterminer un équilibre de Nash, c'est-à-dire un couple de stratégies telles qu'aucun des deux joueurs ne peut modifier seul sa stratégie sans y perdre.

La technique dominante pour déterminer un tel équilibre, la « minimisation du regret contrefactuel » (CFR), consiste à itérer des parties entre deux algorithmes qui cherchent à minimiser la perte subie au tour précédent (les regrets).

En utilisant des techniques de compression et de calcul réparti

ainsi qu'une amélioration de la gestion des regrets, les chercheurs ont réussi à diviser par 26 la mémoire nécessaire et économiser des calculs. En 85 jours de calcul sur une grappe de 200 ordinateurs, ils ont effectué 1 600 itérations de l'algorithme CFR amélioré.

Le couple de stratégies ainsi obtenu est statistiquement

indiscernable de l'équilibre de Nash à l'échelle de 60 millions de parties.

Ces résultats dépassent les seules compétitions de poker : ils pourraient être appliqués aux négociations ou pour déterminer des stratégies médicales.

Philippe Ribeau-Gésippe

M. Bowling et al., *Science*, vol. 347, pp 146-148, 2015



LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Partagez les savoirs

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, dans "l'agenda du jardin"

POUR LA SCIENCE

COURS PUBLICS

Judi 12 février - 18h
Les Néanderthaliens ont-ils disparu ?
M. Patou-Mathis, préhistorienne, directrice de recherches au CNRS, Muséum
Grand Amphithéâtre du Muséum — 57 rue Cuvier, Paris 5^e

FILMS

Séances spéciales FIFE hors les murs
(Festival international du film d'environnement)

Samedi 7 février - 15h30
The Great Flood (La grande inondation)
Réal. : B. Morrison (2012, 71') - Un film d'archives étonnant qui revient sur la grande crue du Mississippi en 1927 et ses conséquences.
Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

Dimanche 8 février - 15h30
Comme des bêtes
(séance interactive en présence de l'équipe du film)
Webdocumentaire (2014) - Une expérience unique de collaboration artistique entre humains et animaux - cygnes, grues, chevaux.
Amphithéâtre de la Galerie de Paléontologie et d'Anatomie comparée — 2 rue Buffon, Paris 5^e

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 22 février - 15h Géographe parmi les grands singes
F. Pennec
Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

Biophysique

Les essaims d'insectes, des systèmes critiques ?

Les mouvements erratiques des insectes dans un essaim ont des propriétés statistiques analogues à celles des transitions de phase chères aux physiciens.

Divers travaux suggéraient que certains systèmes biologiques, par exemple un réseau neuronal ou une nuée d'oiseaux, présentent des comportements analogues à celui d'un système physique en cours de « transition de phase », c'est-à-dire qui change d'état macroscopique. Une équipe de chercheurs romains et milanais apporte de nouvelles observations en faveur de cette idée.

En physique, un exemple simple d'une transition de phase est le passage d'un matériau ferromagnétique de l'état non aimanté à l'état aimanté. Au-dessus d'une température critique T_c , les spins (aimants élémentaires) du matériau ont des orientations aléatoires, d'où une aimantation macroscopique nulle. Au-dessous de T_c , les spins commencent à s'aligner mutuellement, et une aimantation non nulle apparaît.

L'une des caractéristiques du point critique est que les corrélations statistiques y deviennent de portée infinie : à la température T_c , les orientations de deux spins deviennent statistiquement corrélées quelle que soit la distance qui les sépare. Alessandro Attanasi, de l'Université La Sapienza de Rome, et ses collègues ont voulu savoir ce qu'il en est des corrélations pour des essaims de petits insectes voletant dans les parcs romains.

Ils ont enregistré en 3D, à l'aide de trois caméras vidéo, les trajectoires individuelles des insectes au sein de différents essaims et ont calculé, pour chaque essaim, la longueur de corrélation des fluctuations de la vitesse – la distance caractéristique au bout de laquelle les corrélations entre les fluctuations de vitesse de deux insectes deviennent inférieures à un seuil fixé. Et ils ont notamment défini le « paramètre de contrôle », l'analogue de la température du matériau ferromagnétique, comme étant la distance moyenne (pour un essaim donné) entre deux insectes plus proches voisins.

L'équipe italienne a notamment montré que la longueur de corrélation est du même ordre que la taille de l'essaim, et que la distance moyenne entre deux insectes voisins décroît avec le nombre d'individus de l'amas. Ces propriétés s'accordent bien avec le modèle dit de Vicsek, où l'on suppose que chaque individu suit la trajectoire de ses voisins à un « bruit » aléatoire près. Dans ce modèle, le mouvement collectif passe d'un mouvement cohérent à un mouvement désordonné lorsque le bruit aléatoire dépasse un certain niveau.

En d'autres termes, selon les résultats de l'équipe italienne, les insectes d'un essaim ajustent la

Un essaim d'insectes, dont les trajectoires individuelles sont visualisées.



distance qui les sépare, ou l'essaim ajuste le nombre de ses individus, de façon qu'il soit le plus possible « critique », c'est-à-dire que la longueur de corrélation soit maximale. Cela conforte l'idée de la criticalité du système. Mais, commentent Hugues Chaté, du CEA à Saclay, et Miguel Muñoz, de l'Université de Grenade, il faudra étudier des échantillons plus vastes pour parvenir à une conclusion plus certaine.

Quel est l'intérêt d'attendre le point critique ? Ce point sépare deux types de comportement collectif, l'un ordonné, l'autre

désordonné. Si le comportement est trop ordonné, le groupe peut avoir des difficultés à s'adapter à des changements extérieurs, par exemple un prédateur s'approchant d'un côté de l'essaim ; s'il est trop désordonné, sa réaction risque de ne pas être assez forte. Au point critique, la longueur de corrélation étant grande, la réaction de certains individus peut se communiquer aux autres membres du groupe. La criticalité offrirait ainsi au groupe un bon compromis.

Maurice Mashaal

A. Attanasi et al., *Physical Review Letters*, vol. 113, 238102, 2014

Le méthane martien, un pic inattendu

Christopher Webster, de l'Institut de technologie de Californie, et ses collègues ont mesuré la concentration atmosphérique de méthane sur Mars avec un spectromètre du rover *Curiosity*. La concentration moyenne est plus basse que ne le prévoyaient les modèles de dégradation de poussières par la lumière ultraviolette du Soleil. Plus surprenant, les chercheurs ont observé des pics de concentration de méthane provenant probablement d'une source locale, mais qui reste à ce jour non identifiée.

Prion pathogène : du mouton à l'homme ?

L'équipe d'Olivier Andréoletti, de l'Inra à Toulouse, a montré que l'agent responsable de la tremblante du mouton, une protéine prion, est capable de franchir la barrière d'espèce et d'engendrer chez des souris modèles des troubles pathologiques similaires à

ceux observés dans les formes sporadiques de la maladie de Creutzfeldt-Jakob chez l'homme. Pour autant, la tremblante étant une maladie déjà ancienne chez les petits ruminants consommés par l'homme, il n'y a pas de risque nouveau pour la santé publique.

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



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

L'amélioration morale selon les transhumanistes : attention danger !

Certains penseurs transhumanistes prônent le développement artificiel de l'altruisme et du sens de la justice, afin de construire une société plus durable. Une posture inquiétante.

Marina MAESTRUTTI

Nous sommes inadaptés au futur. C'est ce constat que dressent Ingmar Persson et Julian Savulescu, respectivement chercheur et directeur du centre Uehiro de bioéthique à l'Université d'Oxford, dans leur ouvrage *Unfit for the Future*, publié en 2012. Les deux auteurs pointent les dangers de l'écart entre la puissance de nos technologies et notre psychologie morale. L'existence de l'humanité est menacée par le changement climatique, l'épuisement des ressources et de possibles conflits généralisés avec l'utilisation d'armes de destruction massive, mais nous ne parvenons pas à mettre en place des actions collectives et concertées pour y remédier.

Leur réflexion s'inscrit dans le cadre de débats qui agitent le transhumanisme, un courant né à la fin des années 1980 et organisé en associations et groupes informels. Les projets sont très hétérogènes, mais s'accordent en général sur une vision positive des technologies et sur le désir d'augmenter nos performances physiques et cognitives, ainsi que notre durée de vie.

Selon I. Persson et J. Savulescu, l'espèce humaine a développé une psychologie morale « myope », restreinte à la préoccupation pour les personnes et l'avenir proches, car elle a longtemps vécu dans des sociétés relativement petites et unies, avec une technologie peu développée qui ne permettait d'intervenir

que dans l'environnement immédiat. Cependant, grâce à la science et la technologie, nous avons bouleversé nos conditions de vie. I. Persson et J. Savulescu défendent l'idée que pour faire face aux menaces et aux défis qui attendent nos sociétés, nous devons étendre nos préoccupations morales au-delà du petit cercle de nos connaissances personnelles et leur faire englober jusqu'aux générations futures. En particulier, il faudrait augmenter deux caractéristiques « naturelles » du comportement humain, qu'on retrouve aussi chez d'autres animaux : l'altruisme et le sens de la justice.

LE CYBORG HEUREUX – ET LIBRE – des premiers pas du transhumanisme laisse la place au cyborg vertueux, soumis à divers impératifs éthiques.

Comment faire ? Les deux transhumanistes accordent une large place aux recherches pharmacologiques, par exemple sur des antidépresseurs ou des médicaments contre l'hypertension qui ont des effets secondaires sur les comportements moraux. Des médicaments qualifiés d'inhibiteurs sélectifs de la recapture de la sérotonine, couramment prescrits contre la dépression, l'anxiété et les troubles obsessionnels compulsifs, semblent ainsi augmenter, chez les sujets traités, l'impartialité et la coopération. D'autres travaux potentiellement exploitables

commencent à identifier les fondements cérébraux de l'empathie ou divers effets intéressants de l'ocytocine, surnommée l'« hormone de l'amour ».

I. Persson et J. Savulescu citent tout un éventail d'autres pistes pour modifier les comportements et les réponses émotionnelles : stimulation profonde du cerveau par le biais d'électrodes implantées, manipulations génétiques, etc. Une branche de la génétique cherche d'ailleurs à identifier les gènes clefs pour certains comportements – plusieurs gènes ont par exemple été liés à l'agressivité chez la souris, ou à la dépendance, source possible de comportements « immoraux », chez l'homme.

La faisabilité d'outils de modification « d'amélioration morale » fondés sur ces travaux n'est pas acquise. Est-elle seulement souhaitable ?

Cette approche constitue en tout cas une rupture avec le transhumanisme des origines. Au-delà de la diversité des projets, les premiers moments du courant étaient libertaires. Cette mouvance considérait la protection paternaliste de l'État comme inacceptable, et l'évaluation du rapport risques sur bénéfices de l'auto-transformation comme du ressort des individus. L'objectif était d'éliminer toute souffrance et d'atteindre le bonheur, un objectif qualifié d'impératif hédoniste par l'économiste américain David Pearce. Le transhumanisme des origines visait ainsi à réaliser un cyborg heureux.



FAUDRA-T-IL AUGMENTER ARTIFICIELLEMENT NOTRE ALTRUISME pour que nous mettions en place des actions d'envergure suffisante pour préserver la planète ? C'est en tous cas ce que suggèrent certains transhumanistes, qui prônent une « amélioration morale » de l'homme.

La conciliation entre bien-être individuel et collectif (celui des humains mais aussi celui des autres êtres vivants) s'est tout de suite imposée comme un problème de fond. Comment prendre en compte les plaisirs et les souffrances de tous sans sacrifier son propre bien pour celui des autres ? Les premiers théoriciens du transhumanisme, d'inspiration anarcho-capitaliste et libertarienne, comptaient sur l'émergence d'un ordre spontané. Mais à la fin des années 1990, un revirement s'est produit, lié à la crise économique, politique et écologique, et à l'échec des systèmes modernes, en particulier les démocraties libérales occidentales, à réguler les processus d'industrialisation et de mécanisation qui épuisent les ressources de la planète.

Ainsi, le cyborg heureux – et libre – des premiers pas du transhumanisme laisse la place au cyborg vertueux (selon la terminologie du sociologue américain James Hughes), soumis à divers impératifs éthiques. Le débat sur l'amélioration morale se répand dans une partie du mouvement, notamment chez les universitaires d'Oxford. Les approches sont plus ou moins modérées, certains prônant une amélioration morale « à la carte », où chacun serait libre de développer telle ou telle valeur. De vives critiques sont émises, y

compris par certains bioéthiciens partisans du transhumanisme, tel John Harris, de l'Université de Manchester, qui souligne la nécessité du libre arbitre dans la morale humaine. La proposition d'I. Persson et J. Savulescu n'est pas majoritaire dans le mouvement, et même eux reconnaissent en conclusion de leur ouvrage qu'« une réelle amélioration morale serait pratiquement impossible à l'heure actuelle et pourrait rester trop longtemps à un niveau insuffisant de développement, ou ne pas pouvoir être appliquée à une assez large échelle, pour nous aider à faire face aux problèmes catastrophiques décrits ». Néanmoins, pour eux, l'urgence de l'élaboration d'un modèle de société durable justifie un examen approfondi de cette conception extrême de l'amélioration morale.

Or cette dernière est dangereuse. Dans un monde où tous les humains seraient altruistes, un tricheur aurait un pouvoir de nuisance considérable. Il faudrait donc non seulement contraindre tous les citoyens à se plier à l'amélioration morale, mais aussi adopter des formes poussées de surveillance et de contrôle, au prix d'une remise en question des droits tels que la vie privée. Ainsi, l'amélioration morale risque de conduire à une dérive totalitaire. Pour éviter de détruire

le monde, on devrait renoncer aux valeurs des démocraties libérales. Des substances pharmacologiques ou des manipulations génétiques nous inculqueraient les « valeurs » qui nous aideraient à le tolérer. Et cela nécessiterait de confier la détermination de ces valeurs à une assemblée de « philosophes » qui auraient le droit de décider pour tous. Les critères qui présideraient à leur nomination semblent impossibles à établir.

En outre, un tel système risquerait d'aboutir à une vision conformiste de la morale. Déjà, certains transhumanistes font référence à des valeurs religieuses (en particulier bouddhiques) ou traditionnelles, telles que la fidélité dans le couple. De façon générale, les conséquences des techniques d'amélioration morale, qui impliquent de fortes contraintes, restent largement imprévisibles...

Marina MAESTRUTTI est maître de conférences en sociologie à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne et membre du CETCOPRA (Centre d'études des techniques, des connaissances, des pratiques).



Régistrez au
Point de vue sur
www.pourlascience.fr

QUESTIONS OUVERTES

Les nanoparticules nuisent-elles au cerveau ?

Nous sommes de plus en plus exposés à des particules nanométriques produites par l'industrie. Or des expériences sur des animaux suggèrent que de telles nanoparticules risquent d'atteindre le cerveau et de lui être nocives.

Anna BENCSIK

La production mondiale de nanomatériaux – des matériaux comprenant des particules de taille nanométrique (10^{-9} mètre), ou nanoparticules – a été multipliée par dix entre 2002 et 2011. En à peine une décennie, les nanomatériaux sont passés de la recherche à la commercialisation. Les propriétés obtenues sont variées : transparence, légèreté, résistance, durabilité... Dès lors, ils sont intégrés dans de nombreux produits, issus de presque tous les secteurs. On trouve par exemple des nanoparticules dans les composants électroniques des téléphones portables, les bétons, les peintures, les emballages, les catalyseurs, les agents dépolluants, les pales d'éoliennes, certaines boissons... Ces nanoparticules peuvent être libres dans des poudres, en suspension dans un fluide (par exemple dans une sauce, une crème ou une peinture), ou piégées dans une matrice (de plastique, de verre, de béton, etc.).

Les nanomatériaux peuvent aider à répondre à de grands enjeux sociétaux, tels que la transition énergétique, et alimentent une industrie florissante, pourvoyeuse d'emplois. Cependant, ils sont soupçonnés de nuire à la santé, notamment au niveau cérébral. En s'appuyant sur les publications scientifiques cumulée depuis une dizaine d'années, il est aujourd'hui possible de faire un premier état des lieux sur la neurotoxicité potentielle des nanomatériaux.

Les nanomatériaux ne sont pas toujours faciles à tracer, mais il y a eu des progrès récents (voir l'encadré page 16). En France, depuis le 1^{er} janvier 2013, les industriels sont obligés de déclarer leur présence dans les produits. Ces données facilitent l'inventaire des nanoparticules introduites sur le territoire national, même si elles comportent des faiblesses. En outre, en Europe, la présence de nanoparticules doit obligatoirement être indiquée par un étiquetage pour les cosmétiques et les biocides (pesticides, désinfectants, etc.) depuis 2013. Cette obligation devrait être

AVALÉES, INHALÉES OU ÉTALÉES SUR LA PEAU, les nanoparticules pénètrent facilement dans l'organisme.

étendue aux produits du secteur alimentaire (nourriture, additifs, matériaux en contact avec les denrées alimentaires) en 2015.

Les études toxicologiques classiques ne semblent pas adaptées à l'évaluation de la toxicité des nanomatériaux. Il est en particulier difficile d'établir la relation entre dose et effet pour déterminer une exposition maximale autorisée, car l'effet dépend de nombreux paramètres autres que la concentration : taille des nanoparticules, morphologie, propension à s'agréger, solubilité, etc. En outre, il est trop tôt pour qu'une étude épidémiologique permette d'identifier un lien causal entre un signe de nocivité et l'exposition aux

nanomatériaux, ces derniers n'étant répandus que depuis une dizaine d'années. Pour évaluer leur dangerosité, on se fonde alors plutôt sur des expériences de laboratoire, réalisées *in vitro* sur des cellules isolées ou sur des organes mis en culture, ainsi qu'*in vivo* chez l'animal. Et ces expériences donnent quelques motifs d'inquiétude – même s'il faudra beaucoup d'études complémentaires pour évaluer précisément le danger pour la santé humaine.

De par leur petite taille, les nanoparticules pénètrent facilement dans l'organisme, après avoir été avalées, étalées sur la peau ou inhalées (quand elles sont mises en suspension dans l'air, par exemple par un procédé d'usinage). Plusieurs études ont révélé leur présence dans différents organes. Ces travaux soulignent l'atteinte des voies respiratoires et cardio-vasculaires, en particulier dans le cadre d'une exposition professionnelle par inhalation. Les nanoparticules peuvent alors causer des inflammations ou des infections pulmonaires graves, ainsi que des pathologies respiratoires chroniques, telles que l'asthme ; certaines passent dans le sang et atteignent divers autres organes.

Très peu d'études se sont intéressées au cerveau. Pourtant, ce dernier est particulièrement sensible à des stress tels qu'une hypoxie (un manque d'oxygène), une infection, une lésion mécanique ou une inflammation. Plusieurs protections



INGREDIENTS: AQUA / WATER, HYDROXYETHYLCELLULOSE, CYCLOHEXASILOXANE, BUTYROSPERMUM PARKII BUTTER / BUTTER, ALUMINUM STARCH OCTENYLSUCCINATE, SUCROSE STEARATE, CELLULOSE, TRIETHANOLAMINE, DIMETHICONE, DIMETHICONOL, CAFFEINE, SODIUM COCOYL GLUTAMATE, SODIUM HYDROXIDE, SODIUM POLYACRYLATE, SILICA (NANO) / SILICA, PALMITIC ACID, VIGNA ACONITIFOLIA / VIGNA ACONITIFOLIA SEED EXTRACT, HYDROLYZED SOY PROTEIN, CAPRYLIC/CAPRIC TRIGLYCERIDE, ACETYL TRIFLUOROMETHYLPHENYL VALYLGLYCINE, CRITHMUM MARITIMUM EXTRACT, OXOTHIAZOLIDINECARBOXYLIC ACID, ACRYLATES/C10-30 ALKYL ACRYLATE CROSSPOLYMER, RETINYL PALMITATE, PENTAERYTHRITYL TETRA-DI-T-BUTYL HYDROXYHYDROCINNAMATE, METHYLPARABEN, PHENOXYETHANOL, CHLORPHENESIN, ETHYLPARABEN, LINALOOL, GERANIOL, ALPHA-ISOMETHYL IONONE, AMYL CINNAMAL, LIMONENE, CITRONELLOL, BUTYLPHENYL METHYLPROPIONAL, HEXYL CINNAMAL, BENZYL ALCOHOL, BENZYL BENZOATE.

LA LÉGISLATION EUROPÉENNE IMPOSE d'indiquer par une étiquette la présence de nanoparticules pour plusieurs types de produits, tels que les cosmétiques et les biocides.

minaisons nerveuses sensorielles présentes au niveau des bronches, des bronchioles et des alvéoles pulmonaires, mais cela reste à prouver.

Dans le cas d'une ingestion, les études suggèrent que les nanoparticules pénètrent dans le cerveau après un passage préalable dans la circulation sanguine. Mais il est aussi possible qu'elles y entrent *via* les nombreuses terminaisons nerveuses qui tapissent l'appareil digestif. Quant à la voie cutanée, c'est la moins favorable à une pénétration dans le cerveau.

Examinons plus en détail comment les nanoparticules percent les barrières entre la circulation sanguine et le reste de l'organisme. Le franchissement des cellules dites endothéliales, qui isolent les vaisseaux sanguins de l'intestin, de la peau ou des poumons, met en œuvre un processus nommé transcytose : les nanoparticules traversent ces cellules à bord de petites vésicules, puis sont relâchées de l'autre côté. Ce même processus serait utilisé pour franchir la barrière hémato-encéphalique et passer dans le cerveau.

On l'a montré *in vitro* et *in vivo* chez la souris. En 2009, Anja Zensi, de l'Université Goethe à Francfort, et ses collègues ont ainsi injecté des nanoparticules fonctionnalisées (c'est-à-dire habillées de molécules particulières, qui facilitent leur pénétration) par voie intraveineuse à des rongeurs ; certaines de ces nanoparticules ont été détectées dans les cellules endothéliales de la barrière hémato-encéphalique et dans les neurones respectivement 15 et 30 minutes après l'injection. En outre, si les nanoparticules

l'en prémunissent, notamment la barrière hémato-encéphalique, une couche de cellules et de protéines qui entourent les vaisseaux sanguins et les isolent du reste du cerveau, empêchant les agents pathogènes de s'y propager. En outre, les neurones se régénèrent très peu, ce qui accroît la vulnérabilité du cerveau en cas de lésion.

Les études réalisées fournissent tout de même déjà des données clés. Chez l'animal, le passage de nanoparticules dans le cerveau a été mis en évidence pour des nanoparticules de types variés (argent, oxydes de fer, iridium, carbone, polystyrène, etc.) et de tailles allant de 2 à 200 nanomètres (nm).

L'importance de cette pénétration est cependant très variable. Elle dépend de plusieurs paramètres, tels que la voie d'exposition (l'inhalation est la plus efficace), la taille (en moyenne, les particules les plus pénétrantes ont un diamètre moyen compris entre 30 et 60 nm) ou la forme (les nanosphères semblent plus nocives que les nanobâtons ou nanotubes, même si on ne comprend pas encore bien pourquoi). On peut aussi augmenter notablement le franchissement de la barrière hémato-encéphalique

en habillant les nanoparticules avec des molécules particulières, propriété que la nanomédecine cherche à exploiter pour acheminer des médicaments au cerveau, par exemple afin de traiter des tumeurs.

Les chemins vers le cerveau

Comment les nanoparticules arrivent-elles au cerveau ? Elles passent à la fois par la voie nerveuse et la voie sanguine. En 2004, l'équipe de Günter Oberdörster, à l'Université de Rochester aux États-Unis, a reconstitué le chemin emprunté lors d'une inhalation : dans son expérience, des nanoparticules de carbone 13 d'environ 35 nm pénétraient dans les terminaisons nerveuses tapissant l'épithélium olfactif (dans les fosses nasales), puis remontaient le long des prolongements neuronaux et entraient dans le cerveau *via* le bulbe olfactif. Des nanoparticules passent aussi par les poumons, en se répandant d'abord dans le sang puis en franchissant la barrière hémato-encéphalique. Certaines pourraient aussi se propager directement par les ter-

se contentaient de se glisser entre les cellules endothéliales, seules celles de taille inférieure à 4-6 nm pourraient atteindre le cerveau ; or on y a détecté des particules plus grosses.

Dans le cerveau, les nanoparticules peuvent pénétrer dans les cellules de tous types : on en a mis en évidence dans les neurones, les astrocytes (qui assurent diverses fonctions, fournissant par exemple des nutriments aux neurones) et les cellules microgliales (des cellules immunitaires qui protègent le système

nerveux des pathogènes). À l'intérieur de la cellule, les analyses au microscope électronique suggèrent que la capacité de pénétration des nanoparticules dépend principalement de leur taille et de leur habillage de surface, et que certaines s'insèrent dans tous les compartiments cellulaires. On en trouve par exemple dans le cytoplasme et dans le noyau.

Les nanoparticules peuvent alors avoir des effets sur la morphologie, le fonctionnement et la viabilité des cellules nerveuses. Par exemple, certaines expériences ont mis

en évidence une détérioration du cytosquelette cellulaire par les nanoparticules. De même, plusieurs études ont montré que les nanoparticules peuvent entraîner une augmentation du stress oxydatif (une fabrication par la cellule de molécules très réactives, qui oxydent et dégradent d'autres molécules) et des inflammations cérébrales. Ces deux phénomènes sont susceptibles d'endommager les neurones et d'accroître les maladies neurodégénératives, telles que les maladies d'Alzheimer ou de Parkinson. Les nanoparticules paraissent

Le difficile traçage des nanomatériaux

Plusieurs sources d'information fournissent une quantification approximative de la production de nanomatériaux et de l'importance de leur pénétration dans les produits de consommation courante.

LES DÉCLARATIONS DES INDUSTRIELS

La France est le seul pays au monde à avoir mis en place une déclaration obligatoire des nanomatériaux. Depuis le 1^{er} janvier 2013, les industriels doivent publier une déclaration sur un site Internet (www.r-nano.fr) dès lors qu'ils fournissent au moins 100 grammes de substances à l'état nanoparticulaire. Le dernier rapport de synthèse annuel recense 400 000 tonnes de telles substances mises sur le marché en France en 2013.

Ce recensement représente une avancée majeure, mais il comporte certaines faiblesses. Ainsi, l'argent nanométrique en est quasi absent, alors que c'est l'une des nanoparticules les plus utilisées selon d'autres estimations. Pour l'essentiel, il ne serait pas importé en tant que tel, mais déjà intégré aux produits, par exemple dans des appareils électroménagers. Or dans ce

cas, l'importateur n'est pas obligé de déclarer les nanomatériaux contenus dans son produit. En outre, ce recensement ne permet pas d'identifier précisément les produits commercialisés contenant les nanomatériaux déclarés. Des démarches ont été engagées à l'échelle européenne pour y remédier.

LES DONNÉES DU PEN

Le PEN (Project in Emerging Nanotechnologies) est un organisme américain qui inventorie des produits de consommation courante contenant des nanomatériaux. Sur le marché mondial, 54 produits ont été recensés en 2005, 803 en 2008 et 1628 en 2013, indiquant une croissance exponentielle.

Parmi les 1628 produits, 440 sont commercialisés en Europe, dont 32 en France. Ce nombre est sous-estimé, puisque selon un rapport de l'Anses, 246 produits ont été identifiés

en 2010 sur le marché français et 930 en 2013. Cette année-là, les produits contenant le plus de nanoparticules appartenaient aux domaines de la santé et du bien-être, de la maison et du jardin, de l'alimentation et des boissons, puis au secteur automobile.

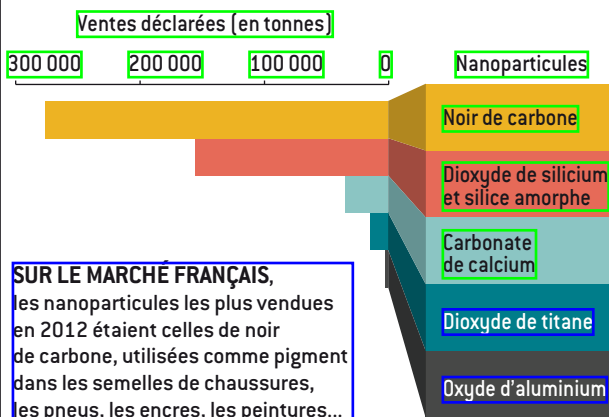
LES DONNÉES DES ASSOCIATIONS

Certaines associations, telles que Avicenn, mettent de nombreuses informations à disposition du public.

La difficulté est que les différentes estimations divergent parfois de plusieurs ordres de grandeur. Divers paramètres

l'expliquent, tels qu'une définition variable des nanomatériaux (dans celle établie par la Commission européenne en 2011, au moins la moitié des particules d'un matériau doivent présenter une ou plusieurs dimensions externes comprises entre 1 et 100 nanomètres pour que ce dernier soit qualifié de nanomatériau).

La terminologie et les estimations restent donc à harmoniser. En outre, il manque un site officiel d'informations français ou européen décrivant les produits déjà mis sur le marché, ainsi que toute l'actualité réglementaire, scientifique, technique et industrielle.



même capables d'entraîner l'apoptose (le suicide cellulaire) des neurones.

Des perturbations de l'activité électrique des neurones ont aussi été relevées, notamment à partir d'études sur des cultures d'hippocampe (une structure cérébrale) ou de neurones du cortex frontal de souris. L'activation de réseaux entiers était parfois inhibée. Or les fonctions de traitement et de transfert de l'information des neurones reposent sur leur activité électrique...

Les nanoparticules sont également susceptibles de perturber la synthèse de neurotransmetteurs (les molécules qui assurent la communication entre neurones). Seraient notamment affectées la dopamine et la sérotonine, deux neurotransmetteurs clefs dans la régulation du sommeil et de l'humeur, et qui ont de nombreuses autres fonctions. En 2013, notre équipe a montré chez la souris que cela peut se traduire par une baisse des capacités locomotrices.

Un impact sur les maladies d'Alzheimer et de Parkinson ?

Enfin, plusieurs expériences en tube à essai ont montré que les nanoparticules peuvent accélérer l'agrégation de certaines protéines formant des fibres dans les neurones ou autour. Ce serait en particulier le cas des protéines bêta-amyloïde et alpha-synucléine, qui s'agrègent respectivement dans les maladies d'Alzheimer et de Parkinson. Les nanoparticules pourraient alors entraîner ou accélérer ces maladies, ainsi que d'autres pathologies neurodégénératives. L'effet dépendrait de leur taille et de leur concentration. À une concentration aussi faible que 20 nanomoles par litre, des nanoparticules d'or de 10 nm de diamètre multiplient par trois la vitesse d'agrégation de l'alpha-synucléine dans un tube à essai.

On manque toutefois de données pour déterminer si cette concentration est représentative de celles qu'on pourrait trouver dans le cerveau humain. Chez l'animal, les quantités détectées dans le cerveau sont généralement très faibles par rapport aux autres organes, preuve de l'efficacité des

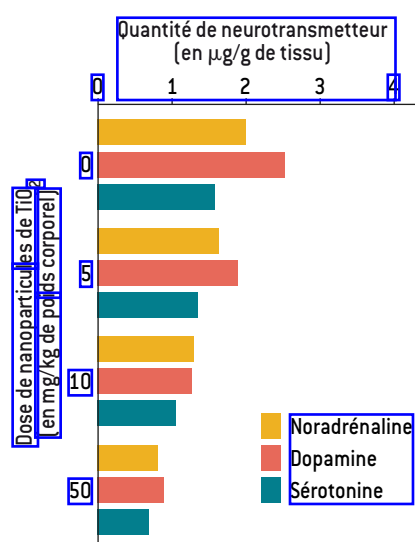
barrières physiologiques qui le protègent. Cependant, les observations *in vivo* restent peu nombreuses et ne couvrent qu'une courte période. Or quelques études suggèrent que les nanoparticules s'accumulent avec le temps, en particulier les nanoparticules métalliques. Celles-ci pourraient alors se révéler les plus délétères – et ce d'autant plus que des taux anormaux de métaux sont associés aux maladies neurodégénératives.

Le déclenchement de stress oxydant et d'inflammations cérébrales, ainsi que l'accélération de l'agrégation de protéines fibrillaires, suggèrent un impact potentiel sur les maladies neurodégénératives. Les travaux de l'équipe de Lilian Calderón-Garcidueñas, de l'Institut national de pédiatrie à Mexico, soutiennent cette hypothèse : des cas de maladies d'Alzheimer et de Parkinson chez des individus jeunes semblent liés à la présence de nanoparticules dans les polluants atmosphériques.

Au moment où l'usage des nanoparticules se généralise, les travailleurs comme les consommateurs se trouvent de plus en plus exposés. Dès lors, il convient d'évaluer de façon spécifique l'impact potentiel des nanoparticules sur le cerveau, en y mettant les moyens nécessaires. Sans attendre des études épidémiologiques, on devrait recourir à des modèles animaux reproduisant des scénarios d'exposition chronique prolongée, pour lesquels les données manquent. Aujourd'hui, de nombreux points restent à confirmer et à préciser, mais on sait déjà que les nanoparticules peuvent avoir divers effets nocifs, même en assez faible quantité.

De multiples informations pourraient aussi venir de la nanomédecine, qui a notamment identifié les voies d'entrée des nanomatériaux dans le cerveau et les paramètres physico-chimiques optimisant cette entrée. Plus généralement, tous les acteurs publics et privés liés au domaine des nanosciences doivent s'unir pour équilibrer au mieux le rapport bénéfices/risques inhérent à tout nouveau domaine.

Anna BENCsik est directrice de recherche au Laboratoire de Lyon de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses).



CERTAINS NEUROTRANSMETTEURS, des substances qui assurent la communication entre neurones, se raréfient quand la concentration cérébrale de nanoparticules augmente. C'est ce qu'ont montré des expériences sur la souris, avec des nanoparticules de dioxyde de titane (TiO₂). La mémoire et les capacités locomotrices peuvent alors être affectées.

BIBLIOGRAPHIE

Avis et rapport de l'Anses relatifs à l'évaluation des risques liés aux nanomatériaux - enjeux et mise à jour des connaissances, Anses, 2014.

A. Bencsik, Le cerveau est-il à l'abri d'un impact d'une exposition à des nanomatériaux ?, *Biologie Aujourd'hui*, vol. 208, pp. 159-165, 2014.

Y. D. Alvarez et al., Influence of gold nanoparticles on the kinetics of alpha-synuclein aggregation, *Nano Letters*, vol. 13, pp. 6156-6176, 2013.

K. Andrieux et P. Couvreur, Des nanomédicaments pour le cerveau, *Pour la Science*, n° 432, octobre 2013.

Comment ma mère a survécu au numérique

par Thierry Viéville, sur *Intelligence mécanique*

« **T**a sœur a beau m'avoir expliqué dix fois : je n'arrive pas à faire gôgole. » C'est une petite dame de 89 ans qui me parle, ma mère. Avant, magnétoscope et autres appareils programmables étaient restés pour elle inaccessibles. Alors avec le numérique, la voilà bien mal partie.

Mais un jour, j'en ai eu assez de lui répéter que *Google* ne se prononce pas gôgole, et que *Word* est un logiciel, et que... stop ! J'ai arraché la connexion Internet de son ordinateur. Et son monde a changé.

Elle : « Mais l'ordinateur n'aura plus de courant sans le câble Internet ? ». Moi : « Si on regarde bien, il y a un deuxième câble branché sur la prise... ». Et nous voilà en train de regarder tous les câbles, boutons et prises de l'appareil ; d'aborder les choses par un aspect inattendu, mais relié à ce qui lui est familier. Ma mère n'a pas besoin de savoir tout ça, me direz-vous. Mais ça a été sa demande pour s'approprier cette machine jusque-là magique. Et la conclusion est tombée : « C'est bien moins compliqué que mon ancienne machine à laver ! »

Ma mère de reprendre : « Est-ce que j'ai toujours gôgole avec l'Internet coupé ? » « Essayons pour voir ». Surprise : gôgole était toujours là – dans la mémoire cache du navigateur. Mais surtout, elle avait ouvert directement *Google*. En lui laissant le temps d'explorer et en lui proposant un premier défi facile, les blocages s'estompaient.

L'ordinateur est alors devenu pour ma mère un objet de curiosité : découvrir ce qui était dedans ou bien « ailleurs », distinguer les applications des données, comprendre qu'un navigateur permet d'accéder à des pages Web, qui sont ailleurs, mais aussi gardées localement en mémoire, etc. Bref, nous avons passé du temps non pas à « apprendre un mode d'emploi », mais à nous amuser à « comprendre comment cela fonctionne ».

Je n'ai pas la panacée, mais une méthode générale : expliquer un concept numérique en faisant l'analogie avec une situation du monde physique (courrier postal contre paquets de données, adresses IP en regard des adresses postales, rangement des fichiers dans des dossiers numériques ou en papier, etc.).

J'ai perçu un basculement de l'abscons vers l'accessible quand les mots évoqués ci-dessus ont pris un sens précis, c'est-à-



Un enjeu pour notre société : donner aux personnes âgées l'accès au numérique.

dire sont devenus des notions, des termes appropriés pour nommer des objets numériques bien définis.

À la fin, ma mère m'a dit : « Finalement, tu ne m'as toujours pas [ré[ré]] expliqué comment se servir de gôgole ? Mais je crois que maintenant, je vais pouvoir me débrouiller ! »

Puis avec ses 90 ans sont arrivées les tablettes tactiles. Plus de clavier, les doigts ont dû apprendre à former des mots en caressant des lettres sur la vitre. Il a fallu que la main apprenne à ne pas toucher l'écran inutilement, car tout geste est devenu performatif. L'apprentissage sensorimoteur des gestes de manipulation, si facile chez les jeunes enfants, doit être intégré très

progressivement par les personnes âgées. On a fait des exercices de dessin avec le doigt et des séquences de clics, comme des gammes au piano. Le point clé est de bien distinguer quand c'est le cerveau qui se trompe de quand c'est la main qui est maladroite.

Météo, démarches administratives, émissions de télévision à la demande, photos de familles, vieux films, lecture... Bien séparer le savoir du savoir-faire a permis que la tablette devienne pour ma mère un trésor de possibilités, une fenêtre sur le monde. Sans comprendre comment cela fonctionne, comment inventer ses propres usages ?

Cela montre en creux que si les jeunes enfants sont doués pour manipuler les outils numériques, il n'y a aucune raison qu'ils puissent spontanément les comprendre. Veut-on faire des enfants des singes savants, consommateurs dociles des produits numériques ? Et des personnes âgées des laissées pour compte ? Le monde est devenu numérique et nous devons tous en comprendre ses fondements scientifiques et techniques, pour y vivre harmonieusement et en profiter réellement. N'en déplaise à ceux qui pensent encore qu'il ne sert à rien d'apprendre à chaque enfant de France les sciences et techniques informatiques. ■



Thierry VIÉVILLE
est directeur de recherche en neurosciences computationnelles à l'Inria (à Sophia-Antipolis) et auteur du blog *Intelligence mécanique* (www.scilogs.fr/intelligence-mecanique).



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

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Les ordinateurs, des révolutionnaires ?

L'informatique a rendu obsolètes nombre de métiers et renouvelle la question de la répartition des richesses.



Au XX^e siècle, trier du courrier, transporter des voyageurs, vendre des disques, etc. demandait un travail important aux postiers, aux conducteurs de métros, aux disquaires, etc. Ce travail n'est plus nécessaire depuis que nos courriers sont électroniques, nos métros automatiques, notre musique dématérialisée, etc. On le constate chaque jour : l'informatique a rendu obsolètes de nombreux métiers.

Il y a tout lieu de se réjouir de ce remplacement de l'homme par la machine. D'une part, il annule l'effet du détestable taylorisme qui, avec le travail à la chaîne, avait transformé l'homme en machine. D'autre part, produire autant en fournissant moins de travail est une aspiration légitime de l'humanité.

Si chacun de nous devait pétrir et cuire lui-même son pain et si nous découvrions une méthode permettant de fabriquer la même quantité de pain avec deux fois moins de travail, nous l'adoptons tous : il n'y aurait pas de luddites ni de néoluddites pour refuser une innovation qui permet à chaque individu de fabriquer autant en se fatiguant moins. La croissance du chômage – alors que la production ne décroît pas – n'est pas uniquement une mauvaise nouvelle : elle indique aussi que nous arrivons à produire autant avec moins de travail.

Toutefois, de multiples raisons, tant éthiques que pratiques, imposent de nous soucier du sort des postiers, des conducteurs

de métros et des disquaires devenus chômeurs. Et c'est là, sur ce qu'il convient de faire, que les points de vue divergent.

Une hypothèse traditionnelle est que, nos désirs étant illimités, l'augmentation de la productivité suscite des demandes nouvelles. Par exemple, entre le début et la fin du XX^e siècle, plus de la moitié de la population active a cessé de travailler la terre. Or ces paysans ne sont pas devenus chômeurs, mais, plus souvent, ouvriers, ingénieurs, employés, etc., la croissance de la productivité agricole ayant suscité une demande nouvelle de produits manufacturés et de services.

Résoudre le problème du chômage ne signifie pas redonner du travail à chacun, mais imaginer une nouvelle organisation de la société, dans laquelle le travail a disparu

Selon cette hypothèse, les postiers, les conducteurs de métros et les disquaires devenus chômeurs ont vocation à exercer d'autres métiers, et notre principale responsabilité collective est de les y préparer.

Cependant, une autre hypothèse peut être avancée, selon laquelle la révolution informatique est d'une nature différente de la révolution agricole. Dans bien des cas, en effet, le remplacement de l'homme par l'ordinateur n'est pas motivé par le fait que les ordinateurs permettent de fabriquer autant avec moins de travail, mais par le fait que les ordinateurs deviennent meilleurs que nous dans la plupart des tâches

productives : conduire des métros, effectuer des simulations numériques, recueillir et traiter des données, rechercher des informations dans une bibliothèque, etc.

Selon les plus radicaux, l'homme n'aura bientôt plus sa place dans ces activités, tout simplement parce que l'évolution technique est plus rapide que l'évolution humaine. Par exemple, en dix ans, notre capacité de mémorisation a sans doute un peu augmenté du fait de la hausse générale du niveau d'éducation dans le monde ; mais cette augmentation est de l'ordre de quelques pour cent au plus. Pendant la même durée, celle des clés USB a été multipliée par mille !

Si l'on suit cette hypothèse, résoudre le problème du chômage ne signifie pas redonner un travail à chacun, ce que de toute façon nous ne parvenons pas à faire depuis bientôt un demi-siècle. Il s'agit plutôt d'imaginer une nouvelle organisation de la société, dans laquelle le travail a disparu – ou, pour être moins caricatural, ne tient plus qu'une place secondaire.

Aux XIX^e et XX^e siècles, les questions sociales ont beaucoup porté sur la répartition des richesses entre le capital et le travail. Ces questions importent aujourd'hui peut-être moins que celle, trop peu débattue, de la répartition des richesses dans une société d'oisifs. ■

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

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



Pourquoi les extraterrestres n'ont-ils pas de cheveux ?

La représentation des extraterrestres traduit une conception lamarckienne de l'évolution du vivant.

Lorsqu'on tape « extraterrestre » dans le moteur de recherche *Google image*, des dizaines d'illustrations nous sont proposées. L'imaginaire humain n'a pas été avare pour donner mille formes à ces mystérieux êtres d'un autre monde. Parfois grands, parfois minuscules, parfois dotés de trois yeux, parfois d'un seul, ces visiteurs, qu'ils soient pacifiques ou agressifs, sont très différents les uns des autres. Un point est cependant frappant par sa constance : la plupart de nos frères de l'espace sont chauves. Que ce soit E. T., les petits-gris ou les Annunakis comme les nomment parfois les experts en la matière, ces visiteurs n'ont pas un cheveu sur le crâne. Est-ce vraiment une coïncidence ?

La plupart des récits prenant pour thème la vie extraterrestre décrivent des civilisations supérieures à la nôtre (ce qui explique qu'ils aient les moyens technologiques de venir nous visiter). Ce qui pourrait donc bien être à l'œuvre ici, c'est une certaine représentation de la théorie de l'évolution. En effet, l'hypothèse implicite qui soutient la description physique de ces êtres est que, très en avance sur nous, ils représenteraient en quelque sorte notre futur développement biologique. Dotés souvent d'un crâne disproportionné par rapport à la taille du corps, ces êtres extraordinaires constituent obscurément l'étape ultime de notre développement.

Ainsi, le cheveu, ce cousin du poil, est-il sans doute vu comme un ersatz d'animalité qui ne sied guère à une conscience supérieure. En outre, les cheveux et les poils, qui ont pu avoir leur utilité en des temps où les

hommes souffraient des rigueurs du climat, seraient voués, la fonction créant l'organe, à disparaître lentement pour dévoiler toute la puissance d'un cortex appelé à devenir toujours plus volumineux.

Cette vision de l'évolution biologique ne respecte pas beaucoup l'orthodoxie de la théorie darwinienne. Elle a plutôt des accents franchement lamarckiens. Jean-Baptiste de Monet, chevalier de Lamarck,



MALGRÉ LEUR DIVERSITÉ, les extraterrestres sont presque toujours représentés chauves. C'est le reflet d'une mécompréhension de la théorie de l'évolution.

considérerait avec Darwin que les espèces n'étaient pas immuables ; mais sa théorie, contrairement à celle de Darwin, admettait que les êtres évoluaient selon les lois d'une mystérieuse force vitale, contenue dans toute vie, qui orientait l'évolution biologique. L'exemple emblématique est l'idée que les girafes ont un long cou parce que la force vitale le leur a allongé, leur nourriture se trouvant sur la cime des arbres. Cette adaptation acquise devenait ensuite innée. Le milieu naturel aurait ici une influence, via l'intervention d'une hypothèse

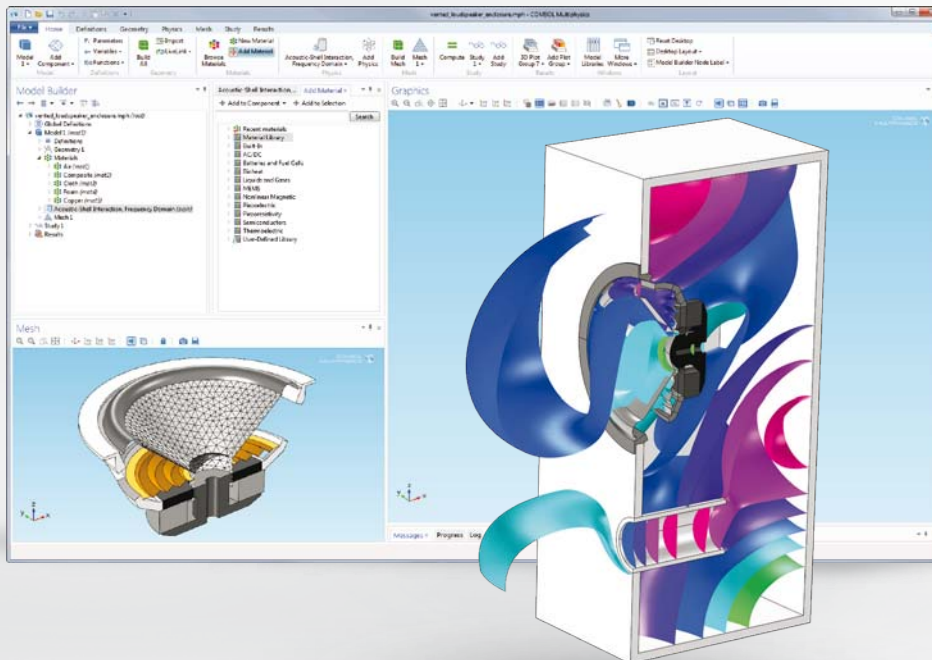
métaphysique (la force vitale), sur la structuration biologique des êtres.

Darwin concevait, au contraire, l'évolution des espèces comme la conséquence d'un processus naturel de sélection qui ne laisse survivre que les individus les mieux adaptés. En d'autres termes, les individus ne s'adaptent pas biologiquement à leur environnement ; s'ils survivent, c'est qu'ils sont, par le hasard des combinaisons génétiques, mieux adaptés que les autres. Par exemple, dans cette théorie, les girafes n'ont pas vu subitement leur cou grandir, mais le hasard a fait que certaines avaient le cou plus long que d'autres. Celles-là avaient plus de facilités pour se nourrir et donc se reproduire. Les gènes des individus les plus adaptés se sont répandus, tandis que les autres se sont raréfiés.

Ainsi, si l'on revient à nos extraterrestres, la représentation d'êtres supérieurs dépourvus de poils paraît trahir l'imaginaire lamarckien de ceux qui les ont conçus. Disons-le tout net, ce serait un miracle remarquable si tous ces frères de l'espace avaient évolué de la même façon vers la calvitie. Bien entendu, les coïncidences extraordinaires surviennent parfois. Mais dans ce cas précis, il serait plus sage, et en tout cas plus parcimonieux intellectuellement, de prendre au sérieux l'idée que ces descriptions sont de simples inventions humaines qui trahiraient la mauvaise conception que nous avons habituellement de la théorie de l'évolution. ■

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

ENCEINTE ACOUSTIQUE: Ondes de pression émises par un haut-parleur. Ce modèle couple l'électromagnétisme dans la bobine, la mécanique des structures dans la membrane ainsi que l'acoustique à l'intérieur et autour de l'enceinte.



TESTEZ ET OPTIMISEZ VOS DESIGNS AVEC

COMSOL MULTIPHYSICS®

Nos outils de simulation multiphysique intègrent tous les effets physiques du monde réel. De ce fait, ils reproduisent avec précision le comportement de vos designs. Pour en savoir plus sur COMSOL Multiphysics, rendez-vous sur www.comsol.fr

Product Suite

COMSOL Multiphysics

ELECTRICAL

AC/DC Module
RF Module
Wave Optics Module
MEMS Module
Plasma Module
Semiconductor Module

MECHANICAL

Heat Transfer Module
Structural Mechanics Module
Nonlinear Structural Materials Module
Geomechanics Module
Fatigue Module
Multibody Dynamics Module
Acoustics Module

FLUID

CFD Module
Mixer Module
Microfluidics Module
Subsurface Flow Module
Pipe Flow Module
Molecular Flow Module

CHEMICAL

Chemical Reaction Engineering Module
Batteries & Fuel Cells Module
Electrodeposition Module
Corrosion Module
Electrochemistry Module

MULTIPURPOSE

Optimization Module
Material Library
Particle Tracing Module

INTERFACING

LiveLink™ for MATLAB®
LiveLink™ for Excel®
CAD Import Module
ECAD Import Module
LiveLink™ for SolidWorks®
LiveLink™ for Inventor®
LiveLink™ for AutoCAD®
LiveLink™ for Creo™ Parametric
LiveLink™ for Pro/ENGINEER®
LiveLink™ for Solid Edge®
File Import for CATIA® V5



Méditation

Comment elle modifie le cerveau

Matthieu Ricard, Antoine Lutz et Richard Davidson

Les neurosciences explorent le cerveau des méditants. Et confirment les effets bénéfiques de ces très anciennes pratiques méditatives.

« **Q**uelle relation pourrait-il y avoir entre le bouddhisme, une ancienne tradition philosophique et spirituelle indienne, et la science moderne ? »

Cette question était posée par Tenzin Gyatso, le quatorzième dalaï-lama (chef spirituel du bouddhisme tibétain), à la rencontre annuelle de la Société des neurosciences, à Washington, en 2005. Quelques centaines de participants – sur un total de 35 000 – avaient alors protesté contre la tribune qui lui était accordée, estimant qu'un chef religieux n'avait pas sa place dans une rencontre scientifique. Pourtant, la collaboration entre science et bouddhisme avait déjà commencé à porter ses fruits.

Le dalaï-lama a entrepris cette collaboration dès les années 1980, suscitant la création de l'Institut *Mind and Life* (Esprit et vie), dédié à l'étude de la « science contemplative ». En 2000, il a suggéré aux chercheurs d'étudier l'activité cérébrale de méditants bouddhistes « experts » – c'est-à-dire ayant entre 10 000 et 60 000 heures de pratique.

L'ESSENTIEL

■ **La méditation, dont il existe diverses formes, s'est répandue dans le monde laïc. Elle est notamment pratiquée dans les hôpitaux et les écoles.**

■ **Elle produit plusieurs effets bénéfiques sur le plan psychologique. Par exemple, les pratiquants contrôlent mieux leur attention et sont moins sensibles au stress.**

■ **L'imagerie cérébrale et d'autres techniques ont permis de montrer qu'elle modifie l'activité et la structure du cerveau.**

Pendant près de 15 ans, plus de 100 méditants bouddhistes – moines et laïques, orientaux et occidentaux, hommes et femmes – et de nombreux débutants ont participé à des expériences sur la méditation dans une vingtaine d'universités, dont celle du Wisconsin à Madison, aux États-Unis. Lors d'études d'imagerie, on a comparé l'activité cérébrale de méditants experts et novices. On a ainsi découvert de premiers éléments expliquant les multiples bénéfices cognitifs et émotionnels que peut apporter cette pratique. De fait, les objectifs de la méditation recoupent largement ceux de la psychologie clinique, de la psychiatrie, de la médecine préventive et de l'éducation. Un nombre croissant de recherches suggèrent qu'elle peut aider à traiter la dépression et la douleur chronique, ainsi qu'à développer un sentiment de bien-être général.

La découverte des bienfaits de la méditation coïncide avec des résultats récents sur la plasticité du cerveau adulte, qui peut être profondément modifié par l'expérience

vécue. Ainsi, chez un violoniste, une région cérébrale qui contrôle les mouvements des doigts s'agrandit progressivement à mesure qu'il apprend à jouer de son instrument. Un processus similaire semble se produire lors de la méditation. Le pratiquant régule ses états mentaux pour parvenir à une forme d'enrichissement intérieur, ce qui modifie le fonctionnement et la structure du cerveau. La méditation semble même susceptible d'augmenter la connectivité des circuits cérébraux et de produire des effets bénéfiques non seulement sur l'esprit et le cerveau, mais aussi sur l'ensemble du corps.

La méditation s'enracine dans les pratiques contemplatives de presque toutes les grandes religions. Elle est très présente dans les médias, mais avec diverses significations. Pour nous, pratiquer la méditation signifiera cultiver des qualités humaines fondamentales, telles que la stabilité et la

commence par adopter une posture physique confortable, ni trop tendue ni trop relâchée, et par souhaiter une transformation intérieure, ainsi que le bien-être des autres et le soulagement de leurs souffrances. Il doit ensuite stabiliser son esprit, trop souvent confus et envahi par un incessant bavardage intérieur. Cela passe par une libération des conditionnements mentaux.

Les neuroscientifiques commencent à découvrir ce qui se passe dans le cerveau au cours de trois types communs de méditation. Ces derniers ont été développés par le bouddhisme et sont désormais pratiqués dans le cadre de programmes laïques, au sein d'hôpitaux et d'écoles du monde entier.

La méditation du premier type, dite par attention focalisée, vise à apprivoiser et à centrer l'esprit sur le moment présent, tout en développant la vigilance.

Celle du deuxième type, qu'on appelle méditation de pleine conscience ou de surveillance ouverte (parfois aussi conscience non réactive), cultive une conscience plus neutre des émotions, des pensées et des sensations, pour éviter qu'elles deviennent incontrôlables et créent une détresse mentale. Dans cette pratique, le méditant demeure attentif à ses ressentis, sans se concentrer sur quelque chose en particulier.

Enfin, un autre type de méditation développe la compassion et l'altruisme envers les autres, tout en réduisant la tendance à rester centré sur soi-même.

Wendy Hasenkamp, de l'Université Emory aux États-Unis, et ses collègues ont utilisé l'imagerie cérébrale (l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, ou IRMf) pour identifier les réseaux neuronaux activés dans la méditation par attention focalisée. Dans le scanner, les participants ont appris à concentrer leur attention sur leur respiration. En général, durant cette forme de méditation, l'esprit se met à vagabonder, et le pratiquant doit en prendre conscience puis recentrer son attention sur le rythme régulier de l'inspiration et de l'expiration.

Le méditant allongé dans le scanner signalait quand son esprit vagabondait en appuyant sur un bouton. Les chercheurs ont identifié un cycle cognitif de quatre phases : un épisode de vagabondage de l'esprit, une prise de conscience de la distraction, un moment de réorientation de l'attention et une nouvelle phase d'attention focalisée.

Dans chacune des quatre phases, des circuits cérébraux particuliers s'activent. Lors de la première, durant laquelle l'esprit se laisse distraire, l'activité augmente dans le réseau dit du mode par défaut. Ce réseau comprend des régions du cortex préfrontal médian, du cortex cingulaire postérieur, du précuneus, du lobe pariétal inférieur et du cortex temporal latéral (voir l'encadré page ci-contre). Il s'active lorsque l'esprit vagabonde tout en étant impliqué dans la construction et la mise à jour de modèles internes du monde, fondés sur des souvenirs à long terme relatifs à soi ou aux autres.

Lors de la deuxième phase, où l'on prend conscience de la distraction, d'autres aires cérébrales s'activent, telles que l'insula antérieure (un repli du cortex au niveau des tempes) et le cortex cingulaire antérieur. Ces aires appartiennent au « réseau de la saillance ». Ce dernier réoriente la conscience vers ce qui est saillant et régule les sensations qui pourraient distraire le sujet au cours de la réalisation d'une tâche. Il jouerait un rôle clé dans la détection d'événements nouveaux et dans le transfert d'activité entre de vastes ensembles de neurones durant la méditation. Il pourrait déplacer l'attention en atténuant l'activité du réseau du mode par défaut, par exemple.

La troisième phase fait intervenir d'autres aires cérébrales, dont le cortex préfrontal dorso-latéral et le lobe pariétal inféro-latéral, qui réorientent l'attention du sujet en la détachant de tout élément susceptible de créer une diversion. Enfin, durant la quatrième et dernière phase, l'activité augmente dans une région située en arrière du front, le cortex préfrontal dorso-latéral, ce qui indique la focalisation de l'attention, sur la respiration par exemple.

Des champions de la concentration et de l'attention

Dans notre laboratoire à l'Université du Wisconsin, nous avons constaté que l'activité cérébrale dans ces aires liées à l'attention dépendait du niveau d'expérience du méditant. Par rapport aux novices, les pratiquants ayant médité plus de 10 000 heures présentaient une activité plus intense. Paradoxalement, pour les plus chevronnés de ces experts, le phénomène s'inversait : leur activité cérébrale était moins intense que celle de leurs confrères un peu moins

Moins

d'efforts sont

nécessaires aux meilleurs méditants pour atteindre une grande concentration : l'imagerie cérébrale le montre.

clarté de l'esprit, l'équilibre émotionnel, le souci des autres et même l'amour altruiste et la compassion – des qualités qui restent latentes tant que nous ne nous efforçons pas de les développer. C'est aussi une familiarisation avec une manière d'être plus sereine et plus souple.

La méditation est relativement simple et peut se pratiquer partout. Aucun équipement n'est nécessaire. Le méditant

LA MÉDITATION SOUS TOUTES SES FORMES

Les progrès techniques, en particulier dans le domaine de l'imagerie cérébrale, ont dévoilé l'activité du cerveau au cours des trois principales formes de méditation bouddhique. Les deux premières se nomment méditation par attention focalisée et méditation de pleine conscience. La troisième développe la compassion et l'altruisme. Les schémas ci-dessous retranscrivent le cycle d'événements qui surviennent pendant la méditation par attention focalisée, ainsi que les activations cérébrales correspondantes.

LA MÉDITATION PAR ATTENTION FOCALISÉE

Dans cette pratique, le méditant se concentre sur un « objet », en général sa respiration. Même chez le sujet expérimenté, l'esprit vagabonde et la concentration doit être rétablie. Différentes régions cérébrales s'activent lors de ces errements de l'attention.

LA MÉDITATION DE PLEINE CONSCIENCE

Cette pratique consiste à observer ses perceptions, ses sensations corporelles internes et ses pensées sans se laisser emporter par elles. Chez les méditants expérimentés, l'activité diminue dans les aires cérébrales liées à l'anxiété, telles que le cortex insulaire et l'amygdale.

LA COMPASSION ET L'ALTRUISME

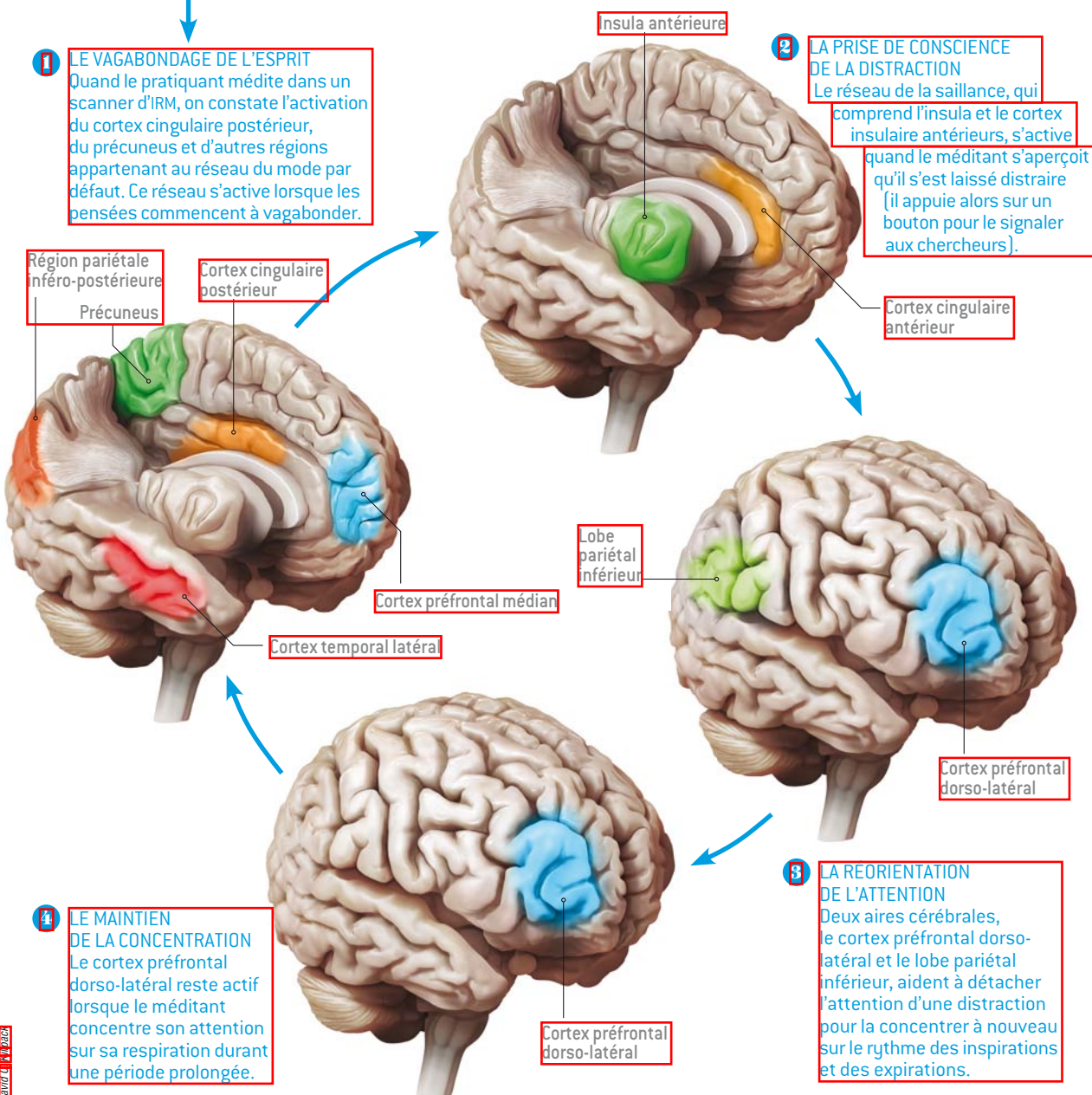
Le méditant cultive un sentiment de bienveillance envers les autres. Les aires cérébrales qui s'activent quand on se met à la place de quelqu'un d'autre (telle la jonction temporo-pariétale) le font plus intensément chez des pratiquants expérimentés que chez des sujets témoins.

1 LE VAGABONDAGE DE L'ESPRIT

Quand le pratiquant médite dans un scanner d'IRM, on constate l'activation du cortex cingulaire postérieur, du précuneus et d'autres régions appartenant au réseau du mode par défaut. Ce réseau s'active lorsque les pensées commencent à vagabonder.

2 LA PRISE DE CONSCIENCE DE LA DISTRACTION

Le réseau de la saillance, qui comprend l'insula et le cortex insulaire antérieurs, s'active quand le méditant s'aperçoit qu'il s'est laissé distraire (il appuie alors sur un bouton pour le signaler aux chercheurs).



expérimentés. Ainsi, les meilleurs méditants semblent avoir besoin de moins d'efforts pour atteindre une grande concentration, un peu comme les musiciens et les athlètes virtuoses s'immergent naturellement dans leur pratique, sans consacrer trop de peine à tout contrôler.

Dans une autre expérience, nous avons examiné des pratiquants de la méditation par attention focalisée avant et après une retraite de trois mois, lors de laquelle ils ont effectué des exercices intensifs pendant au moins huit heures par jour. Nous leur avons donné des casques diffusant des sons de fréquence fixe, parfois mélangés avec des sons légèrement plus aigus. Ils devaient se concentrer sur ce qu'ils entendaient et se manifester quand un son plus aigu retentissait. Après la retraite, les méditants avaient des temps de réaction moins variables que les sujets d'un groupe témoin dans cette tâche répétitive, propice aux distractions. Ce résultat suggère que les méditants avaient une capacité accrue de vigilance. En outre, les réponses électriques de leur cerveau aux sons de fréquence fixe étaient moins variables d'un essai à l'autre, signe que les méditants se laissaient moins absorber par des distractions pendant la tâche.

Le second type de méditation bien étudié implique aussi une forme particulière d'attention. Dans la méditation de pleine conscience, le méditant prend mentalement note de tout ce qu'il voit ou entend, de ses sensations corporelles internes et de son discours intérieur. Il reste conscient de ce qui se passe sans se préoccuper d'aucune perception ou pensée isolée, en revenant à cette concentration détachée chaque fois que son esprit vagabonde. À mesure que la conscience des événements environnants augmente, les sources d'irritation quotidiennes (un collègue en colère, un enfant agité) deviennent moins perturbatrices et une sensation de bien-être se développe.

Avec Heleen Slagter, alors membre de notre équipe, nous avons étudié les effets de cette forme de méditation, en mesurant la capacité des participants à détecter de brefs stimulus visuels. Dans ce type d'expérience, les sujets doivent détecter deux nombres qui se succèdent rapidement sur un écran parmi une suite de lettres. Si le second nombre apparaît environ 300 millisecondes

après le premier, il leur échappe souvent, un phénomène nommé clignement attentionnel. En revanche, s'il est présenté après un délai de 600 millisecondes, il est détecté sans difficulté.

Le clignement attentionnel reflète les limites de la capacité du cerveau à traiter deux stimulus rapprochés. Lorsqu'une partie trop importante de l'attention est consacrée au traitement du premier nombre, le second n'est pas toujours détecté. Nous avons émis l'hypothèse que l'entraînement à la méditation de pleine conscience réduit la propension à « rester collé » au premier nombre. Cette pratique développe une forme de conscience sensorielle non réactive, qui devrait réduire le clignement attentionnel.

Comme prévu, après trois mois de retraite intensive, les méditants percevaient les deux nombres plus souvent que les sujets témoins. Cette amélioration se traduisait par une diminution de l'intensité d'une onde cérébrale particulière, l'onde P3b, qui reflétait l'allocation des ressources attentionnelles au premier nombre. Les caractéristiques de cette onde suggéraient que les méditants étaient capables d'optimiser leur attention pour minimiser le clignement attentionnel.

Rester simplement conscient d'une sensation déplaisante, sans espoir ni crainte, est susceptible de réduire les réponses émotionnelles inadaptées et d'aider à ne plus s'en préoccuper, ce qui peut se révéler utile dans la gestion de la douleur. Dans notre laboratoire, nous avons étudié des pratiquants expérimentés pendant qu'ils s'adonnaient à une forme avancée de médi-

Les aires cérébrales liées à l'anxiété étaient moins actives chez les méditants expérimentés que chez les novices.

tation de pleine conscience, qualifiée de présence ouverte. Dans cette pratique, l'esprit est calme et détendu, n'est concentré sur aucun objet en particulier, mais reste clair, libéré de l'excitation ou de l'ennui. Le méditant observe la sensation douloureuse, sans chercher à l'interpréter, la changer, la rejeter ou l'ignorer. Nous avons constaté que la douleur restait aussi intense chez les méditants, mais qu'elle les dérangeait moins que les membres d'un groupe témoin.

Quel est votre rôle dans les expériences sur la méditation ?

Matthieu Ricard : Parce que j'étais passionné par ce type de recherche, j'ai accepté de participer à de nombreux programmes en tant que « cobaye ambulant ». Sans doute ne suis-je pas seulement un cobaye, car bien souvent je participe à la conception du protocole expérimental, puis à l'interprétation des résultats. Mon apport est alors notamment de les interpréter selon la perspective de la « première personne », c'est-à-dire du méditant.

Le processus de mesure perturbe-t-il la séance de méditation ?

M. R. : Les conditions sont bien sûr plus favorables à une méditation claire et stable sur le balcon de mon ermitage, face à l'Himalaya, au Népal, que lorsque je suis allongé dans un appareil d'IRM, étroit, sombre et bruyant. Cela étant, ce qui caractérise un méditant expérimenté, c'est sa capacité à concentrer son attention ou à cultiver l'amour altruiste dans toutes les circonstances. Les résultats des

Durant la période précédant le stimulus douloureux, les méditants expérimentés présentaient une activité cérébrale moins importante que les novices dans les aires liées à l'anxiété (le cortex insulaire et l'amygdale). En outre, ils s'accoutumaient plus vite à la douleur, les aires cérébrales liées à celle-ci s'activant moins après un certain nombre de stimulus. D'autres tests réalisés dans notre laboratoire ont montré que l'entraînement à la méditation augmente la capacité à contrôler et modérer les réponses physiologiques à un stress social : lorsque le sujet doit parler en public ou procéder à un calcul mental face à un jury sévère, par exemple, il développe moins d'inflammations et sécrète moins d'hormone de stress s'il est adepte de la méditation.

Plusieurs études ont révélé les bienfaits de la pleine conscience sur l'anxiété et la dépression, ainsi que sur le sommeil. Les patients déprimés peuvent utiliser la méditation pour gérer les pensées et les sentiments négatifs qui surviennent spontanément, et ainsi atténuer les ruminations. En 2000, les psychologues cliniciens John Teasdale, alors à l'Université

Matthieu Ricard : témoignage d'un cobaye volontaire



L'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE DE MATTHIEU RICARD,
l'un des auteurs de l'article, est enregistrée
par électroencéphalographie pendant qu'il médite.

15 dernières années de recherche
semblent confirmer cette capacité.

Les résultats neuroscientifiques ont-ils fait évoluer votre pratique ?

M. R. : J'ai longtemps pensé que ma participation à ces travaux ne changeait rien à ma pratique. Puis nous avons tenté de distinguer des états de conscience qui pourraient sembler proches, tels que l'empathie, l'amour altruiste et la compassion. Lorsque j'ai essayé de méditer séparément sur ces divers états, j'ai réalisé à quel point ils avaient des effets différents. Cela m'a beaucoup appris et m'a notamment fait comprendre, lors d'une collaboration avec Tania Singer, que les phénomènes d'épuisement émotionnel rencontrés chez le personnel soignant ne sont pas une « fatigue de la compassion » (comme le laisse supposer la terminologie anglo-saxonne, qui désigne ces phénomènes par ce terme). Il s'agirait plutôt d'une « fatigue de l'empathie », et la compassion est au contraire le remède à cette détresse empathique.

Les connaissances acquises permettent-elles de s'entraîner à la méditation via des techniques de neurofeedback, c'est-à-dire en obser- vant son activité cérébrale en direct ?

M. R. : Je ne pense pas que les dispositifs simples de mesure et de retour d'information (feedback), fondés sur quelques électrodes, puissent beaucoup nous apprendre sur la méditation ou aider le méditant à s'entraîner. Nous avons réalisé quelques expériences avec T. Singer, grâce à des mesures par IRM avec un retour en temps réel : les méditants expérimentés étaient capables de moduler à volonté l'activation des aires cérébrales liées à l'empathie et à la bonté aimante, à divers niveaux demandés par l'expérimentateur (30 %, 60 % ou 90 % de leur capacité maximale). Mais pour moi comme pour d'autres, il était plus facile de moduler l'intensité de la bonté aimante sans le feedback, qui se révélait source de distraction !

Propos recueillis
par Guillaume Jacquemont

d'Oxford, et Zindel Segal, de l'Université de Toronto, ont fait pratiquer pendant six mois la méditation de pleine conscience à des patients qui avaient souffert d'au moins trois épisodes de dépression, en associant cette pratique à une thérapie cognitive. Au cours de l'année suivant la dernière dépression sévère, le risque de rechute était réduit de près de 40 %. Plus récemment, Z. Segal a montré que cette intervention est plus efficace qu'un placebo et équivalait à un traitement par antidépresseurs pour la prévention des rechutes.

La troisième forme de méditation étudiée cultive des attitudes et des sentiments de bonté bienveillante et de compassion envers les autres, qu'ils soient de proches parents, des étrangers ou des ennemis. Cette pratique consiste à prendre conscience des besoins de quelqu'un d'autre, puis à ressentir un désir sincère de l'aider ; on peut aussi souhaiter soulager la souffrance d'autres personnes en les protégeant contre leur propre comportement destructeur.

Se mettre dans un état compatissant peut amener le méditant à entrer en résonance empathique avec une autre personne,

c'est-à-dire à ressentir les mêmes choses qu'elle, mais l'inverse n'est pas toujours vrai. Il ne suffit pas d'une résonance empathique pour entraîner la compassion, et la méditation doit aussi être conduite par un désir désintéressé d'aider quelqu'un qui souffre. On a montré que cette forme de méditation pouvait bénéficier aux professionnels de la santé, aux enseignants et à toutes les personnes susceptibles d'être épuisées émotionnellement par leurs réactions empathiques à la détresse des autres.

La compassion, plus vaste que l'empathie

Le méditant commence par se concentrer sur un sentiment inconditionnel de bienveillance et d'amour pour les autres, en répétant silencieusement une phrase du type : « Que tous les êtres vivants trouvent le bonheur et les causes du bonheur et soient libérés de la souffrance et des causes de la souffrance. » En 2008, nous avons étudié des volontaires expérimentés qui s'étaient entraînés pendant des milliers d'heures. Nous avons observé une augmentation

de l'activité dans plusieurs régions cérébrales pendant qu'ils écoutaient des voix empreintes de détresse. Chez eux, le cortex somatosensoriel secondaire et le cortex insulaire, qui participent à l'empathie et à d'autres réponses émotionnelles, s'activaient plus fortement en réponse à ces voix que chez des sujets témoins. Cela suggère une capacité accrue de partager les émotions des autres, sans qu'aucun signe d'accablement émotionnel n'ait été observé. La pratique de la méditation compassionnelle entraîne également une augmentation d'activité dans des régions telles que la jonction temporo-pariétale, le cortex préfrontal médian et le sulcus temporal supérieur, qui s'activent lorsque nous nous mettons à la place de quelqu'un d'autre.

Plus récemment, Tania Singer et Olga Klimecki, de l'Institut Max Planck à Leipzig, en Allemagne, ont cherché à distinguer les effets de l'empathie et de la compassion chez les méditants, en collaboration avec l'un d'entre nous (M. Ricard). Ils ont constaté que la compassion et l'amour altruiste étaient associés à des émotions positives, tandis que l'épuisement émotionnel serait une

sorte de fatigue empathique. D'après la tradition contemplative bouddhique, dont dérive cette pratique, la compassion, loin de conduire à la détresse et au découragement, renforce la puissance de l'esprit, l'équilibre intérieur et la détermination à aider ceux qui souffrent. Quand un enfant est hospitalisé, la présence de sa mère est plus bénéfique si elle tient sa main et le réconforte que si, accablée par une détresse empathique et incapable de supporter la vue de son enfant malade, elle fait les cent pas dans le vestibule. Dans le second cas, la mère peut finir par ressentir un épuisement émotionnel, à l'instar de 60 % des soignants américains.

Pour explorer plus avant les mécanismes de la compassion et de l'empathie, O. Klimecki et T. Singer ont réparti près

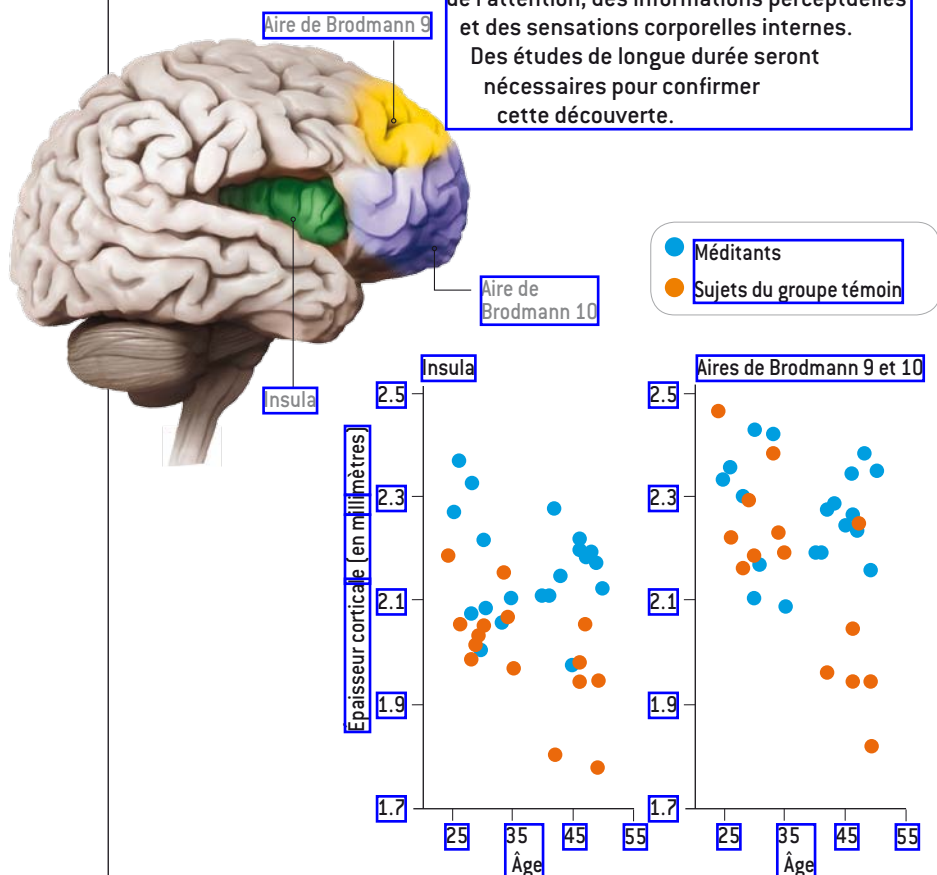
de 60 volontaires en deux groupes. Ceux du premier ont médité sur l'amour et la compassion, tandis que ceux du second ont suivi un protocole expérimental visant à développer leurs sentiments d'empathie envers les autres. Après une semaine de ce traitement, les chercheuses ont analysé les réactions des sujets à des vidéos de personnes qui souffrent. Leurs résultats, préliminaires, montrent que les participants du premier groupe ont éprouvé des sentiments plus positifs et bienveillants, tandis que ceux du second ont ressenti des émotions en profonde résonance avec les souffrances présentées. Ces émotions ont déclenché des pensées et d'autres sentiments négatifs, qui ont abouti à une plus grande détresse et parfois à une perte de contrôle.

Conscientes de ces effets déstabilisants, T. Singer et O. Klimecki ont prescrit au groupe qui avait développé son empathie des séquences de méditation pour travailler la compassion et la bonté aimante. L'exercice a contrebalancé les effets préjudiciables de l'entraînement à l'empathie : les émotions négatives ont diminué et les émotions positives ont augmenté. Ces résultats s'accompagnaient de changements au sein de plusieurs réseaux cérébraux associés à la compassion, aux émotions positives et à l'amour maternel, incluant le cortex orbito-frontal, le striatum ventral et le cortex cingulaire antérieur. En outre, les chercheuses ont montré qu'une semaine d'entraînement à la compassion favorisait les comportements prosociaux dans un jeu virtuel développé pour mesurer la capacité à aider les autres.

QUAND LA MEDITATION GONFLE LE CERVEAU

Une équipe de chercheurs de plusieurs universités a montré que la méditation modifie la structure du cerveau. En observant ce dernier par imagerie par résonance magnétique (IRM), ces scientifiques ont découvert que les pratiquants expérimentés présentaient un volume plus important de tissu cérébral que les sujets du groupe témoin dans l'insula et dans le cortex préfrontal, plus précisément dans les aires de Brodmann 9 et 10 (voir les graphiques). Ces régions sont impliquées dans le traitement

de l'attention, des informations perceptuelles et des sensations corporelles internes. Des études de longue durée seront nécessaires pour confirmer cette découverte.



Une porte d'accès à la conscience

De façon générale, la méditation offre un moyen d'étudier la conscience et les états mentaux subjectifs. Lors d'une séance de méditation compassionnelle, nous avons mesuré par électroencéphalographie (EEG), à l'aide d'électrodes posées sur le crâne, l'activité électrique du cerveau de pratiquants bouddhistes expérimentés. Durant de telles séances, les méditants décrivent des fluctuations de la sensation du soi, auparavant stable et bien définie.

Nous avons constaté que ces pratiquants arrivaient à créer un motif particulier dans le tracé électroencéphalographique. Il s'agissait d'oscillations de grande amplitude dans la bande de fréquences dite gamma (entre 25 et 42 hertz), ce qui traduit une synchronisation importante de l'activité neuronale à ces fréquences. Une telle synchronisation pourrait être cruciale dans l'intégration de divers aspects cognitifs et affectifs pendant l'apprentissage et la perception consciente. En effet, elle permettrait la mise en œuvre de réseaux neuronaux temporaires chargés de cette intégration, un phénomène susceptible d'aboutir à des changements durables dans les connexions cérébrales.

Les oscillations de forte amplitude persistaient pendant plusieurs dizaines de secondes et s'intensifiaient au fil de la méditation. Les tracés électroencéphalographiques différaient de ceux des sujets témoins, en particulier au niveau du cortex fronto-pariétal latéral. Chez les méditants expérimentés, cette activité

cérébrale particulière pourrait traduire une meilleure conscience de l'environnement et des processus mentaux intérieurs, bien que des recherches complémentaires soient nécessaires pour mieux comprendre le fonctionnement des oscillations gamma.

Des aires cérébrales qui changent de volume

La méditation modifie également le volume de certaines aires cérébrales, sans doute en raison de changements du nombre de connexions entre cellules nerveuses. Une étude préliminaire menée par Sara Lazar, de l'Université Harvard aux États-Unis, et ses collègues a révélé des différences entre l'insula et le cortex préfrontal de méditants expérimentés et de sujets d'un groupe témoin. Plus précisément, le volume de matière grise (constituée essentiellement des corps cellulaires de neurones) n'était pas le même dans les régions nommées aires de Brodmann 9 et 10, souvent activées pendant la méditation. Ces différences étaient supérieures chez les participants les plus âgés, suggérant que la méditation influe sur l'amincissement cortical provoqué par le vieillissement.

S. Lazar et ses collègues ont aussi découvert un effet de la méditation de pleine conscience sur l'amygdale, une aire cérébrale intervenant dans le traitement de la peur. Ils ont entraîné à cette forme de méditation des sujets dont ils mesuraient par ailleurs la sensibilité au stress. Pour ceux chez qui cette sensibilité diminuait le plus, les chercheurs ont constaté un rétrécissement de l'amygdale.

Dans une autre étude, Eileen Luders, de l'Université de Californie à Los Angeles, et ses collègues ont observé chez les méditants certaines spécificités des axones (des prolongements neuronaux pouvant relier différentes régions cérébrales), qui suggéraient une multiplication des connexions cérébrales. Tous ces résultats semblent accréditer l'idée que la méditation entraîne des modifications structurales dans le cerveau. Cependant, on manque d'études de longue durée, où un groupe est suivi sur plusieurs années, ainsi que de comparaisons systématiques entre des méditants et des personnes de milieux et d'âges similaires qui ne méditent pas.

Quelques études suggèrent que la méditation ne modifie pas que le cerveau, mais aussi le reste du corps. Elle pourrait ainsi atténuer les inflammations et d'autres stress moléculaires. Une équipe dirigée par Perla

LES AUTEURS



Matthieu RICARD est docteur en génétique cellulaire et moine bouddhiste tibétain.



Antoine LUTZ est chercheur à l'Université du Wisconsin à Madison, aux États-Unis, et chargé de recherche de l'Inserm au Centre de recherche en neurosciences de Lyon.



Richard DAVIDSON dirige le Laboratoire Waisman d'imagerie cérébrale et du comportement, à l'Université du Wisconsin à Madison.

Kailman, de l'Institut de recherche biomédicale de Barcelone, a montré tout récemment que chez des pratiquants expérimentés, une journée intensive de méditation de pleine conscience influe sur les enzymes régulant la lecture du génome et diminue l'expression de gènes responsables des inflammations.

Cliff Saron, de l'Université de Californie à Davis, a étudié l'effet de la méditation sur la longévité des cellules. Il s'est intéressé à une enzyme nommée télomérase, qui rallonge des segments d'ADN à l'extrémité des chromosomes. Ces segments, les télomères, assurent la stabilité du matériel génétique pendant la division cellulaire. Ils raccourcissent chaque fois qu'une cellule se divise et, quand leur longueur descend sous un seuil critique, la cellule stoppe ses divisions pour entrer en sénescence. Après que les méditants eurent effectué une retraite, l'activité de la télomérase était plus élevée chez ceux dont le stress psychologique avait le plus diminué que chez les sujets d'un groupe témoin. Cette découverte suggère que la méditation de pleine conscience pourrait ralentir le vieillissement cellulaire chez certains pratiquants.

Un chemin vers le bien-être... et vers des sociétés meilleures ?

Près de 15 années de recherche révèlent qu'une pratique assidue de la méditation modifie l'organisme. Des études complémentaires sont nécessaires pour isoler les effets de cette pratique de ceux d'autres facteurs psychologiques. Par exemple, les résultats peuvent être influencés par le degré de motivation d'un pratiquant, par le charisme de l'enseignant ou par les échanges avec les autres élèves dans un groupe de méditation. De multiples paramètres restent également à étudier : éventuels effets négatifs, durée optimale des sessions, ajustements aux besoins individuels...

Quoi qu'il en soit, les recherches sur la méditation apportent de nouvelles connaissances sur les méthodes d'entraînement mental, susceptibles d'améliorer la santé et le bien-être. Non moins important, la compassion, avec d'autres qualités humaines, est le fondement d'un cadre éthique indépendant de toute philosophie ou religion, et leur développement par la méditation pourrait bénéficier à nos sociétés. ■

BIBLIOGRAPHIE

W. Hasenkamp *et al.*, Mind wandering and attention during focused meditation : a fine-grained temporal analysis of fluctuating cognitive states, *NeuroImage*, vol. 59(1), pp. 750-760, 2012.

Dossier La méditation, *Cerveau&Psycho*, n° 52, pp. 20-46, juillet-août 2012.

A. Lutz *et al.*, Mental training enhances attentional stability : neural and behavioral evidence, *Journal of Neuroscience*, vol. 29(42), pp. 13418-13427, 2009.

M. Ricard, *Plaidoyer pour le bonheur*, Nil Editions, 2003.



Le noyau atomique entre liquide et cristal

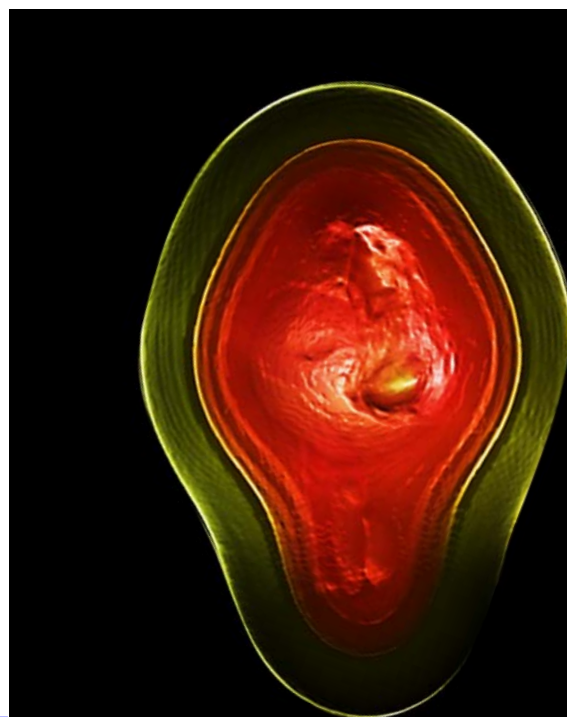
**Aplati, en poire, plutôt liquide, avec un halo... :
le noyau des atomes présente toute une variété
de formes et d'états. Une diversité
que les physiciens commencent à expliquer.**

Jean-Paul Ebran et Elias Khan

La matière qui nous entoure est composée d'atomes, mais à quoi ressemblent-ils ? Héritée du modèle du physicien néo-zélandais Ernest Rutherford (1871-1937), la représentation la plus courante d'un atome est celle d'un système planétaire microscopique, où des électrons sont en orbite autour d'un noyau sphérique. Avec la mécanique quantique, la représentation s'est affinée en faisant correspondre au cortège électronique un nuage (de densité de probabilité de présence des électrons) plutôt que des orbites. Quant au noyau atomique, est-il vraiment sphérique ? Les physiciens qui l'étudient en ont une image bien plus complexe. Les modèles théoriques et les expériences ont mis en évidence des noyaux aplatis, en bulle, en forme de poire ou de banane, des noyaux dont la structure rappelle celle des molécules (voir les illustrations ci-contre), etc.

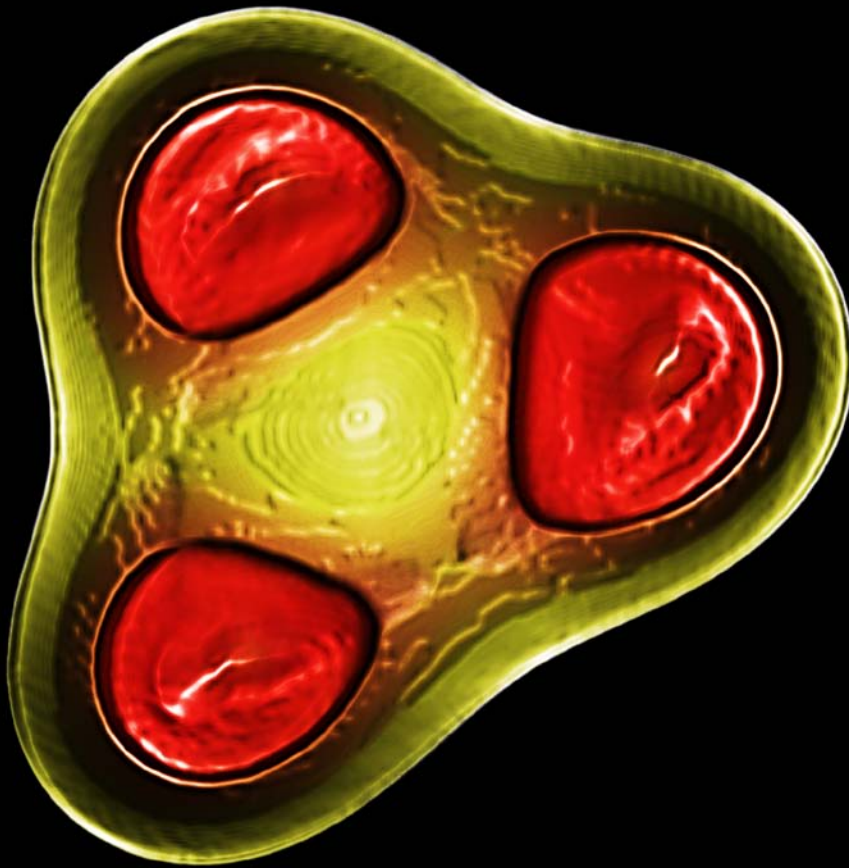
Cependant, plus d'un siècle après sa découverte, le noyau atomique n'a pas livré tous ses secrets. Nous ne disposons pas d'une vision globale du noyau qui permette d'expliquer cette diversité de structures dans un cadre unique. Et pour cause, le noyau est un objet quantique difficile à étudier : il est constitué d'éléments eux-mêmes complexes, et trois des quatre forces fondamentales de la nature participent à la dynamique de cet assemblage.

L'idée que la variété découle d'un petit nombre de règles fondamentales n'est pas nouvelle. Les chimistes



Néon 20

Carbone 12



L'ESSENTIEL

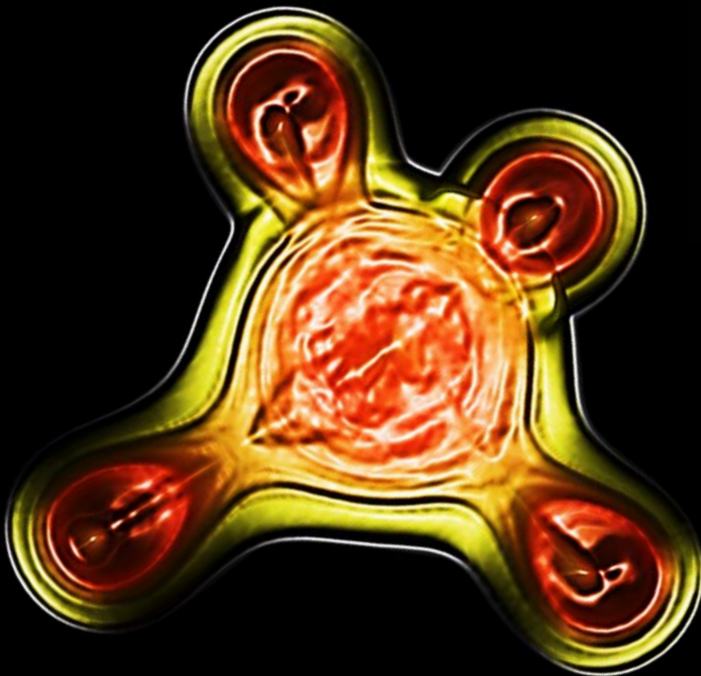
■ Le noyau atomique présente une grande diversité de formes et de structures.

■ La compétition entre le caractère quantique des éléments du noyau et leurs interactions permet de définir trois phases : le « liquide quantique », le « noyau moléculaire » et une phase cristalline.

■ Certains noyaux sont constitués en agrégats, tels les atomes dans une molécule. Cet état « moléculaire » a été essentiel dans la formation des éléments tel le carbone.

■ La phase cristalline est présente dans les étoiles à neutrons.

Soufre 32



Néon 20

AU SEIN DE CERTAINS NOYAUX ATOMIQUES, les nucléons (protons ou neutrons) forment des sous-ensembles denses (*en rouge*) liés par l'interaction forte. On parle de « noyaux moléculaires », car ils rappellent les molécules, dont les atomes forment des liaisons électroniques. Ces images sont le résultat de simulations numériques.

LES AUTEURS



Jean-Paul EBRAN est chercheur au CEA à Arpajon.

Elias KHAN est professeur à l'Université Paris-Sud et à l'Institut de physique nucléaire d'Orsay. Il est membre de l'Institut universitaire de France.

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. Ebran *et al.*, Density functional theory studies of cluster states in nuclei, *Physical Review C*, vol. 90, 054329, 2014.

G Burgunder *et al.*, Experimental study of the two-body spin-orbit force in nuclei, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, 042502, 2014.

L. P. Gaffney *et al.*, Studies of pear-shaped nuclei using accelerated radioactive beams, *Nature*, vol. 497, pp. 199-204, 2013.

J.-P. Ebran *et al.*, How atomic nuclei cluster, *Nature*, vol. 487, pp. 341-344, 2012.

J. Erler *et al.*, The limits of the nuclear landscape, *Nature*, vol. 486, pp. 509-512, 2012.

J. Novak, Les étoiles à neutrons, *Dossier Pour la Science*, n° 75, avril-juin 2012.

ont ainsi ordonné les éléments dans un tableau en fonction de propriétés qui dépendent du nombre d'électrons sur les couches externes de l'atome. Par ailleurs, les centaines de particules découvertes dans les collisionneurs, répondant au nom de hadrons, ont pu être classées lorsqu'on a compris qu'elles étaient un assemblage de particules élémentaires, les quarks.

Pour comprendre la variété des structures du noyau, nous avons donc recherché des règles sous-jacentes et développé une approche théorique qui rend compte des différentes phases du noyau. Similaires aux phases solide, liquide et gazeuse de la matière ordinaire, ces phases dépendent des propriétés de ses composants, les protons et les neutrons. Il est donc essentiel de comprendre la structure du noyau avant d'en étudier les différentes phases.

Au cœur du noyau

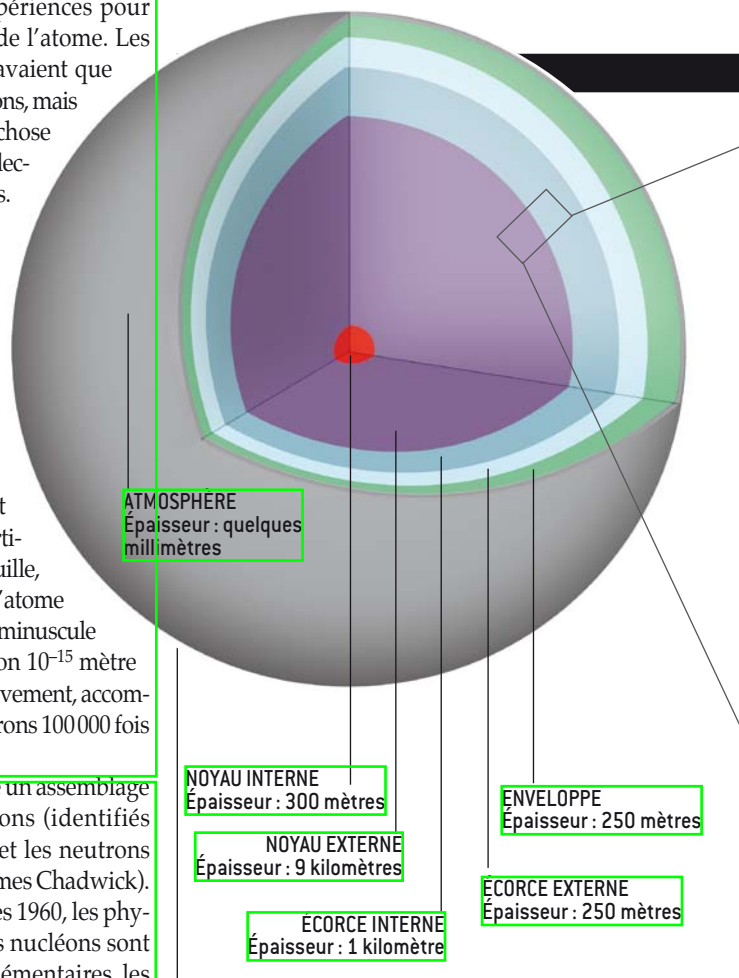
La vision que l'on a du noyau atomique n'a cessé d'évoluer depuis sa mise en évidence en 1911 par Rutherford. Ce physicien menait alors des expériences pour comprendre la structure de l'atome. Les chercheurs de l'époque savaient que l'atome contenait des électrons, mais il devait renfermer autre chose pour compenser la charge électrique négative des électrons. On pensait l'atome comme un objet de 10^{-10} mètre de diamètre dans lequel les électrons étaient incrustés, à l'image d'un gâteau contenant des raisins secs. En bombardant une feuille d'or avec des particules α (des noyaux d'hélium) et en mesurant l'angle de déviation des particules rebondissant sur la feuille, Rutherford a compris que l'atome est en réalité constitué d'un minuscule noyau très dense, d'environ 10^{-15} mètre de diamètre et chargé positivement, accompagné d'un cortège d'électrons 100 000 fois plus étendu que lui.

Le noyau est lui-même un assemblage de « nucléons » : les protons (identifiés par Rutherford en 1917) et les neutrons (découverts en 1932 par James Chadwick). Par la suite, dans les années 1960, les physiciens ont montré que les nucléons sont constitués de particules élémentaires, les

quarks et les gluons. Pour l'essentiel, le proton est composé de deux quarks u et un quark d , tandis que le neutron est l'assemblage de deux quarks d et un quark u . La cohésion entre les quarks est assurée par l'interaction forte, véhiculée par des gluons, dont le nom indique leur fonction de colle entre les quarks.

C'est également l'interaction forte qui colle les nucléons et maintient la cohésion du noyau. En réalité, la description du nucléon fournie par la chromodynamique quantique – la théorie qui décrit l'interaction forte – est celle d'une « soupe » d'une multitude de quarks et gluons en interaction. Du fait de cette complexité, l'interaction forte entre nucléons n'est que partiellement comprise.

Pour compléter ce tableau, il faut ajouter que les protons sont chargés positivement ; par conséquent, la force électromagnétique a une influence dans le noyau. Enfin, les nucléons sont sensibles à l'interaction faible, qui se manifeste par la radioactivité bêta, où, par exemple, la transformation d'un neutron en un proton s'accompagne de



l'émission d'un électron et d'une autre particule au caractère élué, le neutrino.

Ainsi, pour étudier le noyau, il faut prendre en compte trois des quatre forces fondamentales (les interactions forte, faible et électromagnétique) et tous ses nucléons. C'est un grand défi d'ordre mathématique. Pourquoi? Il est assez aisé d'obtenir une description précise d'un système de deux particules en interaction. Il est aussi possible d'étudier statistiquement un système formé d'un très grand nombre d'éléments, un gaz par exemple, et de calculer ses grandeurs thermodynamiques (pression, température, etc.).

Cependant, entre ces deux régimes, pour un noyau formé d'une dizaine ou quelques centaines de nucléons, on ne sait décrire le système ni de façon exacte ni de façon statistique. Par exemple, l'ajout d'un seul nucléon à un noyau en bouleverse les propriétés!

Si la complexité du noyau atomique rend son étude très ardue, elle est aussi la source d'une grande diversité de phénomènes touchant la structure du noyau

et sa dynamique. Comment intégrer cette variété dans une description fondamentale et unifiée du noyau atomique?

Une approche fructueuse est de considérer que le noyau peut présenter différentes phases qui découlent de la compétition entre la nature quantique des nucléons et leurs interactions. D'après le principe de dualité onde-corpuscule, les nucléons présentent à la fois des propriétés d'onde

Pour classer les diverses formes de noyaux, il faut considérer la nature quantique des nucléons.

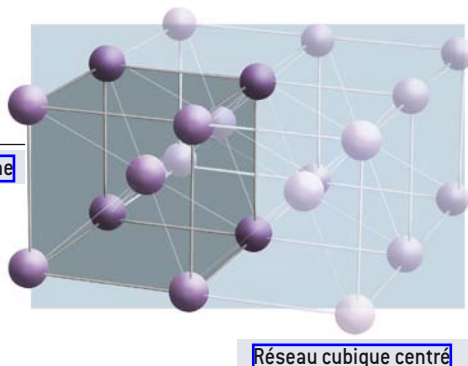
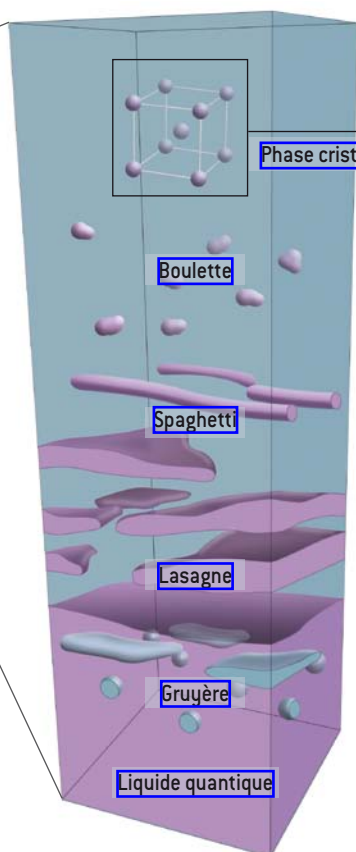
et de particule. Mathématiquement, ils sont décrits par une fonction d'onde qui détermine leur probabilité de présence: selon que cette fonction est concentrée dans l'espace ou étendue, chaque nucléon est plus ou moins bien localisé dans le noyau. Les interactions des nucléons influent directement sur leur localisation.

Plus l'interaction d'un nucléon avec ses congénères domine l'agitation des protons et des neutrons, plus la position du nucléon sera bien déterminée.

Dans une étude récente, nous avons considéré deux grandeurs caractéristiques du noyau: la dispersion spatiale des fonctions d'onde des nucléons et la distance moyenne entre ces particules. Le rapport de ces deux caractéristiques – le « paramètre de phase » – nous a permis de définir trois phases dans le noyau: liquide, moléculaire et cristalline. Les nucléons y sont plus ou moins localisés, ce qui influe sur la structure, les propriétés et la forme du noyau.

Ces phases étaient déjà connues, mais leur description faisait appel à des modèles qui coexistaient, sans que l'on puisse les relier. Il est maintenant possible d'appréhender la diversité des phénomènes observés dans les expériences nucléaires par une approche unique et en partie fixée par le paramètre de phase (voir la figure page 34).

DE LA MATIÈRE NUCLÉAIRE EXOTIQUE DANS LES ÉTOILES À NEUTRONS



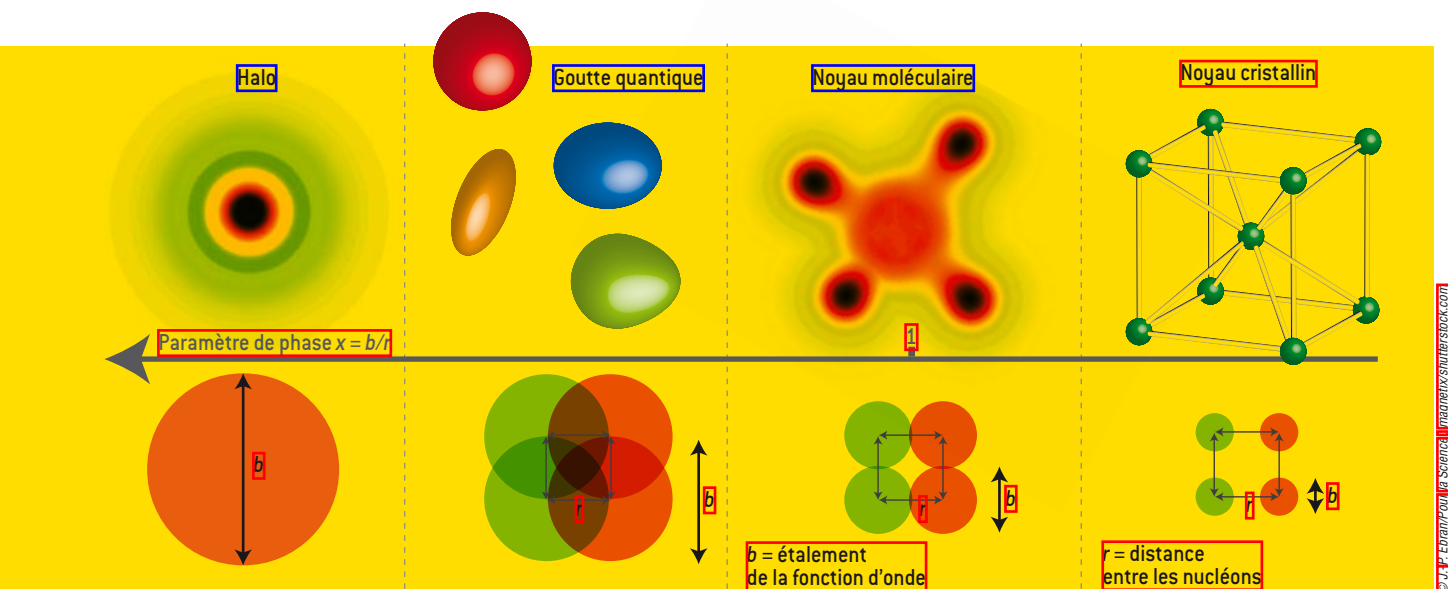
Les étoiles à neutrons se forment lorsque le cœur d'une étoile massive en fin de vie s'effondre. La densité de ces astres est élevée et avoisine les 100 millions de tonnes par centimètre cube, une valeur comparable à celle d'un noyau atomique. La différence avec un noyau est qu'une étoile à neutrons présente un diamètre d'une dizaine de kilomètres. Une densité aussi élevée a d'importantes conséquences sur la structure de la matière de l'étoile.

Dans la matière ordinaire, les noyaux, de charge électrique positive, se repoussent. À température suffisamment basse, ils se stabilisent aux nœuds d'un réseau cristallin. La force nucléaire, attractive mais de portée beaucoup plus courte, assure la cohésion des neutrons et protons au sein de chaque

noyau. Dans une étoile à neutrons, la gravité domine la répulsion électromagnétique et impose une courte distance entre les noyaux.

L'enveloppe de l'étoile est constituée d'un réseau cristallin de noyaux de fer baignant dans un gaz d'électrons. Dans l'écorce externe, la densité est plus forte, de sorte que des protons interagissent avec les électrons et forment des neutrons. Le réseau cristallin est alors constitué de différents noyaux de numéro atomique proche de celui du fer. Comme les noyaux sont alors très riches en neutrons, ces derniers commencent à s'échapper des noyaux pour former un gaz de neutrons.

Dans la partie interne de l'écorce des étoiles à neutrons, la densité atteint celle des noyaux atomiques. L'équilibre entre la force attractive nucléaire, la répulsion électrique et la gravité devient complexe et donne naissance à des états exotiques de la matière en forme de « boulettes », de « spaghettis », de « lasagnes » et de « gruyère » de plus en plus riches en neutrons et denses. Ces états sont bien décrits par les modèles moléculaires nucléaires. Cette transition conduit à une phase homogène dans la partie interne de l'écorce, de type liquide nucléaire, mais à une échelle macroscopique. La composition exacte du cœur varie selon les modèles utilisés pour décrire les étoiles à neutrons.



LES NOYAUX ATOMIQUES présentent une grande variété de structures qu'il est possible de classer à l'aide d'un paramètre dit de phase. Ce paramètre est le rapport de deux longueurs : l'étalement de la fonction d'onde décrivant l'état quantique de chaque nucléon (b) et la distance moyenne entre nucléons (r).

Dans la grande majorité des cas, les nucléons formant le noyau s'organisent dans une phase de liquide quantique. Il faut préciser que les nucléons sont des fermions, c'est-à-dire des particules dont le spin – le moment cinétique intrinsèque – est demi-entier (ici $1/2$) dans les unités atomiques. Les fermions identiques sont soumis au principe d'exclusion de Pauli qui leur interdit d'être dans un même état quantique.

L'approche phénoménologique du liquide quantique a été introduite par le physicien soviétique Lev Landau en 1956. Dans cette phase, l'interaction entre nucléons est importante, mais elle ne suffit pas pour dominer l'agitation de ces derniers. Elle rappelle la phase liquide de la matière ordinaire où les molécules sont en interaction mais où l'agitation thermique reste importante.

Comme les interactions des nucléons sont insuffisantes, ceux-ci sont délocalisés dans l'ensemble du volume du noyau. Leurs fonctions d'onde sont très étalées et se recouvrent, ce qui confère au noyau une densité relativement homogène.

De telles propriétés autorisent une description du noyau en terme de ce que l'on appelle le champ moyen : un puits de potentiel commun à tous les nucléons capture l'essentiel de la physique du système de nucléons en interaction. Ainsi, dans cette approche, chaque nucléon subit un même potentiel qui résume l'influence des autres particules.

La forme du potentiel nucléaire moyen n'est pas simple à définir, car il faut prendre en compte les spécificités de l'interaction forte et le fait que les nucléons engendrent eux-mêmes ce potentiel.

Cette approche a permis de décrire de nombreux phénomènes. Le noyau atomique, dans sa phase de type liquide quantique, présente une grande variété de comportements, comme le laisse supposer la malléabilité propre aux liquides. Ainsi, le noyau peut se déformer lorsqu'il est excité et, parfois, même dans son état de plus basse énergie (non excité), il n'est pas sphérique. Il peut alors adopter des formes exotiques, allant de la soucoupe au ballon de rugby en passant par une forme de poire (observée pour la première fois de façon directe en 2013 grâce à l'installation *Isolde* au Cern).

Des liquides quantiques superfluides

Outre les déformations, le modèle de liquide quantique décrit d'autres propriétés nucléaires. En raison de la nature fermionique des nucléons, on observe dans certains noyaux des corrélations entre deux nucléons. Cela conduit à la formation de paires de fermions, dites de Cooper, et à la superfluidité nucléaire. Ce processus est analogue aux paires de Cooper formées par les électrons dans les métaux supraconducteurs, mécanisme qui conduit à annuler la résistance électrique du matériau. La viscosité du liquide nucléaire diminue drastiquement s'il est superfluide. Cela a un impact sur le moment d'inertie, qui

7 000
noyaux instables.

Plus difficiles à étudier
et bien plus nombreux
que les noyaux stables,
ils pourraient révéler
de nouveaux états
de la matière.

détermine l'énergie du noyau en fonction de sa vitesse de rotation autour de lui-même. Ce phénomène doit être pris en compte lors des mesures en laboratoire.

Dans la phase liquide quantique, le puits de potentiel a une profondeur trop faible pour localiser les nucléons dans le noyau. Le paramètre de phase, le rapport de la dispersion spatiale de la fonction d'onde d'un nucléon et de la distance entre deux nucléons voisins, est alors très supérieur à un. Si le potentiel était profond, les nucléons seraient plus localisés, le paramètre de phase diminuerait et l'on tendrait vers une phase cristalline nucléaire, où les nucléons se situeraient aux mailles d'un réseau, comme dans un cristal.

Cette phase cristalline existe-t-elle dans la nature ? Voyons comment le paramètre de phase peut diminuer. Si le nombre de nucléons du noyau augmente, la profondeur du puits de potentiel augmente et le paramètre de phase diminue. Mais on obtient rapidement un effet de saturation, conséquence de la courte portée des forces s'exerçant entre les nucléons : la

profondeur du puits de potentiel atteint une valeur limite quasi indépendante du noyau considéré. Par ailleurs, on montre que la dispersion spatiale de la fonction d'onde augmente avec le nombre de nucléons. Finalement, un noyau riche en nucléons aura un comportement de liquide quantique et un paramètre de phase supérieur à un.

Un noyau léger ne contient pas suffisamment de nucléons pour former une structure cristalline. Cet état ne semble donc pas possible dans un noyau atomique. En revanche, il pourrait exister dans l'écorce des étoiles à neutrons. Prédites peu après la découverte du neutron dans les années 1930, ces étoiles sont restées hypothétiques jusqu'à ce que, en 1967, Jocelyn Bell, une doctorante, découvre les pulsars, caractérisés par une émission radio d'une période allant de quelques dizaines de millisecondes à quelques secondes. Un pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide émettant un jet qui balaie l'espace de façon périodique, comme un phare. On en a observé quelques milliers à l'heure actuelle.

De masse comparable à celle du Soleil mais avec un rayon d'une dizaine de kilomètres, les étoiles à neutrons sont parmi les objets les plus denses de l'Univers : un centimètre cube d'un tel astre pèse environ 100 millions de tonnes. Cette densité extrême est comparable à celle des noyaux atomiques. Ce lien entre la physique du noyau et l'astrophysique conduit à modéliser les étoiles à neutrons comme des sortes de noyaux géants. Or on calcule que les effets gravitationnels très intenses imposent dans les couches externes de ces étoiles une densité qui conduit à l'apparition de cristaux nucléaires (voir l'encadré page 32).

Ces étoiles pourraient héberger d'autres formes exotiques de la matière. Leur écorce présente une structure cristalline tandis que le noyau interne est décrit comme un liquide quantique nucléaire de plusieurs kilomètres de rayon. Entre ces deux régions, il existerait une phase hybride de type « molécule nucléaire ». Cette phase se caractérise par une dispersion de la fonction d'onde des nucléons du même ordre de grandeur que la distance

L'état de Hoyle, un noyau de carbone moléculaire

Quelques minutes après le Big Bang, à des températures de l'ordre de quelques milliards de degrés, les protons et les neutrons ont fusionné pour former de l'hydrogène, du deutérium (un isotope de l'hydrogène avec un neutron), de l'hélium et des traces de lithium 7. C'est la « nucléosynthèse primordiale ».

Aucun noyau doté de cinq ou huit nucléons n'est suffisamment stable pour que ce processus de fusion se poursuive vers les noyaux plus lourds. Ainsi, la fusion de deux noyaux d'hélium échoue. La nucléosynthèse primordiale du Big Bang s'arrête.

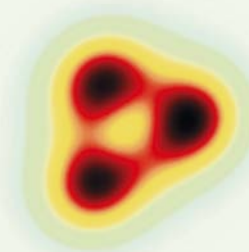
Les éléments plus lourds, tel le carbone, se forment bien plus tard dans les étoiles, qui présentent des températures et des densités élevées. La densité peut y être cent fois plus importante que dans l'Univers, lors de la nucléosynthèse primordiale. L'hydrogène est le combustible principal. L'énergie libérée lors de la fusion de noyaux crée une

pression de radiation qui s'oppose à l'effondrement gravitationnel de l'étoile. L'hydrogène est progressivement consommé et remplacé par de l'hélium. Mais quand l'hydrogène vient à manquer, la contraction de l'étoile reprend. La densité augmente et la fusion de l'hélium peut avoir lieu. Deux noyaux d'hélium fusionnent pour donner un noyau de béryllium 8, lequel fusionne à son tour avec un noyau d'hélium, ce qui donne un noyau de carbone 12. C'est la réaction dite triple α (car le noyau d'hélium est aussi nommé particule α).

Cette réaction est *a priori* peu probable, car le béryllium 8 est

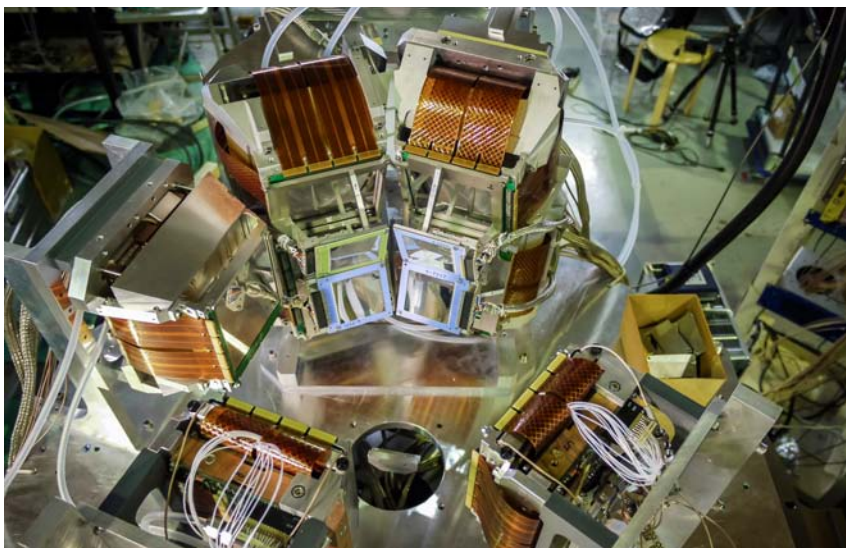
très instable et se désintègre la plupart du temps avant qu'une troisième particule α n'interagisse et fusionne avec lui. Un premier facteur facilite néanmoins cette réaction : l'état fondamental du béryllium 8 a quasiment la même énergie que deux particules α . Cela permet donc de produire facilement du béryllium 8, mais cela ne suffit pas pour produire du carbone 12.

En 1954, le physicien anglais Fred Hoyle a alors fait un raisonnement étonnant. Puisque nous observons du carbone dans l'Univers, la réaction triple α doit avoir lieu, donc le carbone 12 doit nécessairement présenter un état excité formé de trois particules α (dit état de Hoyle) dont l'énergie serait quasi égale à celle d'un atome de béryllium 8 et d'une particule α , ce qui faciliterait cette fusion (l'existence de cet état excité augmente la probabilité de formation du carbone 12). Cet



L'ÉTAT DE HOYLE est un noyau de carbone 12 excité, qui constitue un état moléculaire où les nucléons se regroupent en formant trois particules α .

état moléculaire n'a été mis en évidence que quelques mois après la prédiction de Hoyle. L'état excité est néanmoins instable et se décompose la plupart du temps en béryllium. Mais une fois sur 2500, le noyau se désexcite sans se désintégrer et forme un noyau stable de carbone 12. Cela ouvre ensuite la voie à la formation de l'oxygène et tous les éléments plus lourds.



LE NOYAU MOLÉCULAIRE est l'une des phases nucléaires les plus étonnantes, où les nucléons se regroupent en particules α (états liés de deux protons et deux neutrons). Ce serait le cas pour le carbone 12, qui contiendrait trois particules α , ou le néon 20, qui en contiendrait cinq. Pour identifier de tels états, les physiciens ont calculé que lorsque ces noyaux se désintègrent, ils émettent plus facilement une particule α , que le dispositif MUST2 (ci-dessus) au Ganil, à Caen, peut détecter.

moyenne qui les sépare (le paramètre de phase vaut environ un).

Cette phase moléculaire existe aussi dans certains noyaux formés de quelques dizaines de nucléons. Ces noyaux gagnent en stabilité lorsque les nucléons se regroupent en agrégats, chacun formant une particule α (deux protons et deux neutrons).

Ces noyaux moléculaires rappellent les molécules classiques constituées d'atomes, à la différence que les noyaux moléculaires sont 100 000 fois plus petits. En outre, les noyaux ayant peu de protons, mais un excédent de neutrons, ils développent facilement une structure en agrégats : les neutrons excédentaires, faiblement liés, se délocalisent entre les agrégats et jouent le même rôle stabilisateur que les électrons dans les liaisons de valence entre les atomes d'une molécule.

L'idée d'un noyau structuré en agrégats de nucléons remonte aux années 1930, quand les physiciens américains Lawrence Hafstad et Edward Teller ont proposé que les noyaux de béryllium 8, carbone 12, oxygène 16 et néon 20, qui ont autant de protons que de neutrons, pouvaient être décrits par des assemblages de particules α . Il faudra attendre les années 1960 pour voir l'élaboration des premiers outils théoriques dédiés à leur description et la mise en place d'expériences les révélant. C'est ainsi que l'on découvrit que les noyaux légers ayant un nombre égal de protons et de neutrons

ont tendance à exhiber des agrégats de nucléons dans leurs états excités.

L'existence du carbone 12 est la meilleure preuve que certains noyaux sont dans la phase moléculaire (voir l'encadré page 35). La synthèse de cet élément dans les étoiles passe par une réaction clé : la fusion de trois particules α qui produit un état excité, décrit comme un état moléculaire de trois particules α et nommé état de Hoyle. Sans la formation de cet état excité, la synthèse du carbone, de l'oxygène et de tous les éléments plus lourds serait bloquée.

Le halo : des neutrons très délocalisés

Notre approche fondée sur le paramètre de phase a permis de classer un grand nombre de configurations nucléaires selon trois phases. Ainsi, les noyaux riches en nucléons forment des liquides quantiques, tandis que les noyaux légers présentent parfois un comportement moléculaire.

Cependant, les noyaux atomiques peuvent se trouver dans d'autres états exotiques, tels les halos. En 1985, Isao Tanihata et ses collègues ont mesuré le rayon de plusieurs noyaux légers au Laboratoire Lawrence Berkeley, aux États-Unis. Le lithium 11 a un diamètre comparable à celui du plomb 208, alors qu'il a 20 fois moins de nucléons. Ce noyau est doté d'un halo formé par deux neutrons très délocalisés.

D'autres noyaux riches en neutrons exhibent aussi une structure de halo.

Cette délocalisation de la fonction d'onde de certains nucléons dans les noyaux à halo provient de leur faible énergie de liaison. Plusieurs observations directes de noyaux à halo ont été réalisées dans différents laboratoires dans le monde, comme au Ganil (Grand Accélérateur national d'ions lourds) en France. L'état de halo s'intègre dans notre description unifiée des divers états nucléaires. Il serait un cas extrême de délocalisation de la fonction d'onde de certains nucléons.

La difficulté expérimentale pour étudier de nouvelles formes nucléaires est qu'elles apparaissent dans des noyaux instables, dont la durée de vie est de l'ordre de quelques nanosecondes à quelques millisecondes. Ces noyaux se désintègrent en effet rapidement par interaction faible. Il en est ainsi pour les noyaux bulles, sortes de noyaux creux prédits par les théoriciens. La déplétion de matière en leur cœur est due à un effet spécifiquement quantique : la probabilité de présence des protons au centre du noyau est très faible – un effet surprenant, le cœur des noyaux atomiques étant en général ultradense.

Cet état serait un cas particulier des liquides quantiques. Certains indices expérimentaux de l'existence de noyaux bulles ont récemment été obtenus au Ganil. La prochaine étape consiste à mettre en évidence de façon directe le creux de matière au sein de ces noyaux, dont un candidat est le silicium 34 instable.

Les noyaux instables représentent 95 % des édifices nucléaires connus, alors que les noyaux stables, tel celui de l'oxygène que nous respirons, n'en constituent que 5 %. La physique nucléaire du XX^e siècle a été marquée par l'étude des 300 noyaux stables et a ouvert la voie à l'étude des noyaux instables. Les expériences de notre siècle s'orientent vers une étude systématique de ces derniers, qui se comptent par milliers. Les installations les plus récentes (ou en construction) au Japon, aux États-Unis et en Europe (France, Allemagne, Cern) permettront de se rapprocher de la limite théorique d'existence des noyaux, dont on estime le nombre total à environ 7 000.

Nous découvrirons alors peut-être de nouveaux états de la matière qui nécessiteront d'affiner nos modèles, voire des formes et états que les physiciens n'ont pas encore imaginés. ■

★ MUSÉE DU QUAI BRANLY
là où dialoguent les cultures



Week-end
gratuit

★
**L'ETHNOLOGIE
VA VOUS SURPRENDRE !**

Deux jours pour explorer le XXI^e siècle

Conférences | Débats | Projections
Lectures | Visites spéciales...



Avec la participation
de la
Comédie-Française

www.quaibranly.fr

14 et 15 mars 2015

#WeekendEthno

paris
île-de-france



laRockuptibles

Libération

LE
HUFF
POST

SCIENCES
AVENIR

cnrs
le journal



Inca Kola. Marcos Lopez © musée du quai Branly

Kainua une ville étrusque sort de terre

Mal connue, la vie quotidienne étrusque se dévoile grâce aux fouilles d'une cité abandonnée au IV^e siècle avant notre ère. Parmi les découvertes : une villa d'architecture romaine, qui a donc deux siècles d'avance...

Martin Bentz

La confédération des 12 cités étrusques avait un sanctuaire fédéral, le *Fanum Voltumnae*. Dans son IV^e livre, Tite Live (-59 à 17) évoque plusieurs fois le temple du dieu suprême étrusque Voltumna, parce que l'on y prenait toutes les décisions concernant les intérêts panétrusques. Outre les grandes assemblées que l'on y convoquait, les Étrusques y organisaient un grand marché annuel et leurs jeux sportifs. Après l'absorption de l'Étrurie par Rome, le *Fanum Voltumnae* a sombré dans l'oubli. À partir du XIV^e siècle, les érudits européens se sont interrogés sur son emplacement et l'ont recherché en vain...

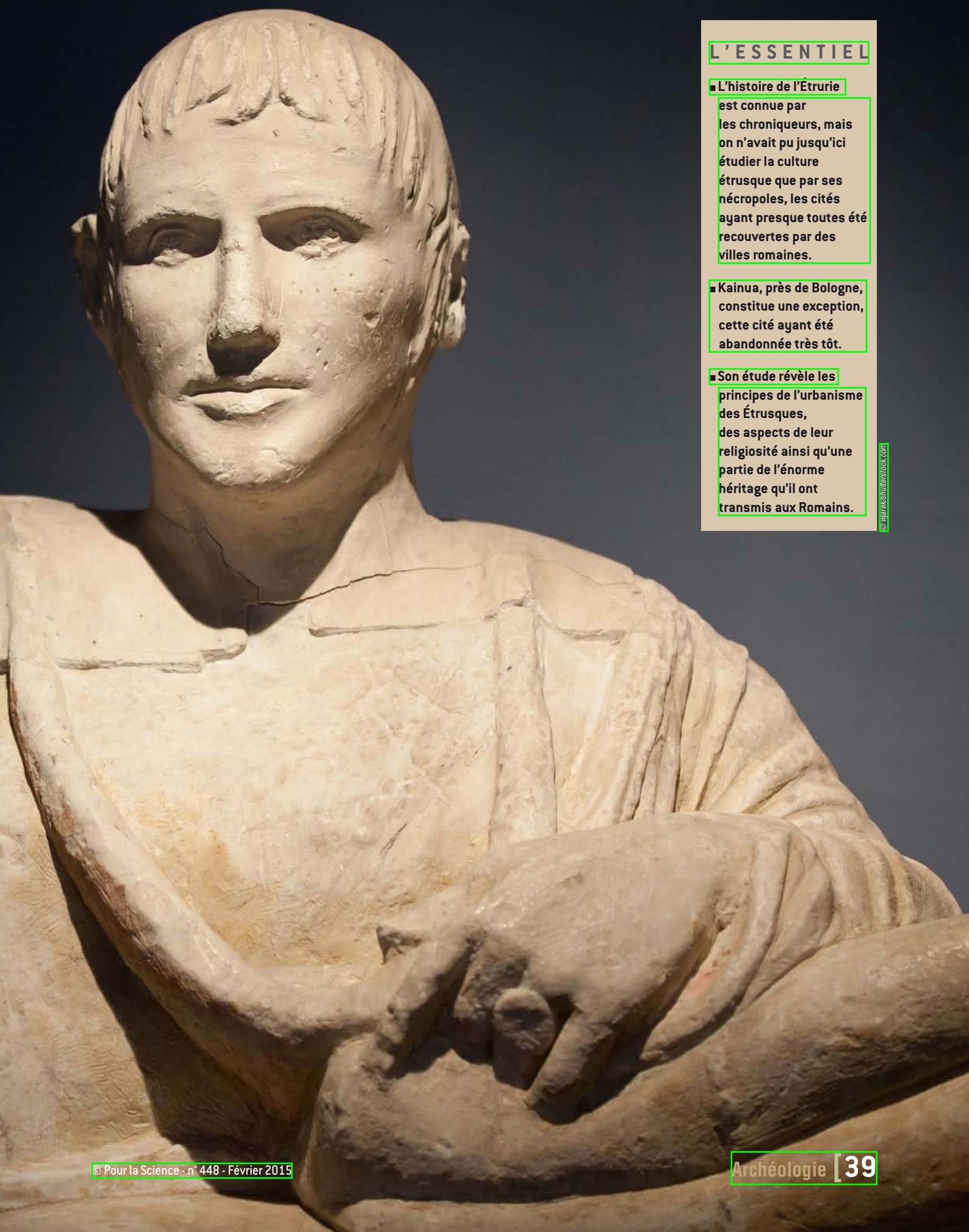
Pour les étruscologues, l'égarement du *Fanum Voltumnae* dans les limbes du temps, c'est un peu comme si l'on ignorait où se trouvent la Delphes des Grecs ou la Rome des catholiques... Après l'avoir recherché des siècles durant, ils ont fini par penser que si ses traces ont disparu, c'est parce que le grand sanctuaire était bâti en matériaux périssables... Cependant Simonetta Stopponi, n'y croyait pas.

Cette archéologue de l'Université de Pérouse s'est acharnée à traquer le *Fanum Voltumnae* jusqu'à découvrir récemment un site prometteur près de la ville d'Orvieto. L'endroit pourrait en effet bien correspondre au grand sanctuaire, puisqu'on y a trouvé une allée processionnelle et des monceaux de restes d'offrandes. L'archéologie étrusque réserve encore des surprises...

Pour autant, de nombreux aspects de la vie étrusque paraissaient perdus à jamais, notamment parce que les informations dont nous disposons proviennent presque seulement des nécropoles et des textes. Cette impression se relativise cependant, en particulier grâce aux progrès dans la connaissance de Kainua, une cité étrusque abandonnée qui – fait exceptionnel – n'a pas été recouverte à l'époque romaine. Quels sont les éléments nouveaux apportés par ces fouilles, auxquelles nous avons eu la chance de participer ? Avant de les présenter, résumons nos connaissances essentielles sur les Étrusques.

Les Étrusques se nommaient eux-mêmes *Rasna* ou *Rasenna* ; les Grecs les

CE PERSONNAGE ÉTRUSQUE
est représenté sur le couvercle de ce sarcophage en albâtre du III^e siècle avant notre ère, découvert à Colle del Vescovo. Manifestement, l'artiste a cherché à exprimer la dignité et l'opulence du défunt.



L'ESSENTIEL

■ L'histoire de l'Étrurie

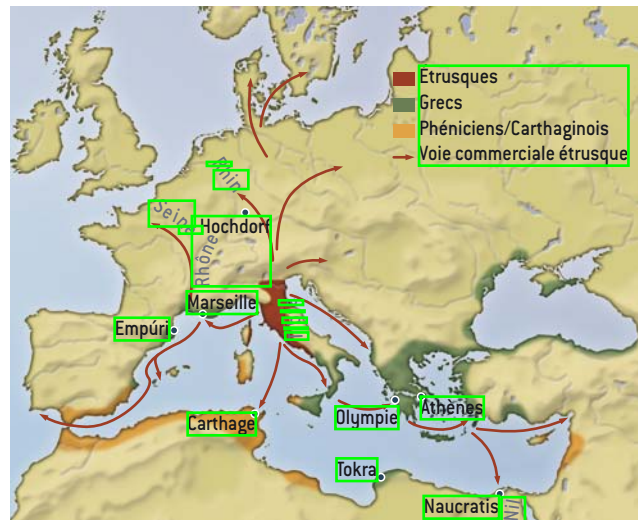
est connue par les chroniqueurs, mais on n'avait pu jusqu'ici étudier la culture étrusque que par ses nécropoles, les cités ayant presque toutes été recouvertes par des villes romaines.

■ Kainua, près de Bologne, constitue une exception, cette cité ayant été abandonnée très tôt.

■ Son étude révèle les

principes de l'urbanisme des Étrusques, des aspects de leur religiosité ainsi qu'une partie de l'énorme héritage qu'il ont transmis aux Romains.

© iStockphoto.com



PENDANT L'ÂGE D'OR ÉTRUSQUE, entre le VIII^e et le V^e siècle avant notre ère, les échanges internationaux (*ci-dessus*) passaient en majorité par le territoire étrusque, lequel englobait alors le Latium, la Campanie, la plaine du Pô et une partie de la Corse (*à gauche*). Les Étrusques commerçaient non seulement avec les Grecs, les Égyptiens et les Carthageois et toutes les cultures méditerranéennes, mais aussi avec les Celtes transalpins et les Germains.

appelaient *Tyrrhenoi* et les Romains *Tusci* ou encore *Etrusci*. La culture étrusque a marqué l'Italie entre le VIII^e et le II^e siècles avant notre ère, puis Rome l'a absorbée. Son territoire d'origine couvre à peu près la Toscane, la partie nord du Latium et l'Ouest de l'Ombrie (*voir la figure ci-dessus*). Sa frontière occidentale est la mer Tyrrhénienne, c'est-à-dire la « mer des Étrusques », tandis que le Tibre constitue sa frontière méridionale et orientale, et l'Arno marque celle du Nord, là où se dressent les Appenins. Cette situation géographique implique que les Étrusques avaient comme voisins les Latins, les Sabins et les Falisques au Sud, les Ombriens et les Picéniens à l'Est, et les Ligures et les Vénètes au Nord.

Au V^e siècle avant notre ère, alors que la culture étrusque connaissait son âge d'or, le domaine d'influence étrusque s'est étendu au Nord jusqu'en Campanie. La présence des Étrusques dans la plaine du Pô sécurisait leur commerce avec les Celtes transalpins, leur donnait accès aux ports de l'Adriatique et, ainsi, un contact direct avec les colonies grecques d'Italie du Sud. Les Étrusques étaient par ailleurs présents en Corse, entretenaient un comptoir dans le Sud de la Gaule (*voir l'encadré page 43*) et commerçaient en Afrique du Nord.

Plutôt tournées vers l'intérieur des terres, les cités du Nord de l'Étrurie

– Volterra ou Chiusi par exemple, étaient érigées sur des collines abruptes. D'avantage tournées vers le commerce maritime, les cités du Sud – telles Vulci, Tarquinia ou Caeré – se dressaient en général au bord d'un plateau dominant une vallée fluviale.

Une fois par an, le *Fanum Voltumnae* accueillait un grand rassemblement pan-étrusque. Les Étrusques n'étaient toutefois pas constitués en nation. Ils formaient plutôt une confédération de cités indépendantes, que l'on nomme la dodécapole étrusque ou la ligue étrusque. Leur langue et leur religion les liaient donc davantage que ne

Au V^e siècle avant notre ère, l'historien grec Hérodote écrit que les Étrusques descendaient des Lydiens.

le faisait la faible organisation politique de leur ligue. Un prêtre ou un fonctionnaire était néanmoins chargé de la diriger : le *Zilath mechl rasnal*, nom étrusque devenant dans les sources romaines *Praetor etrusiae*, c'est-à-dire « magistrat d'Étrurie ».

Les cités étrusques étaient dirigées par des rois nommés *Lucumones*. Toutefois, vers la fin du VI^e siècle avant notre ère, une forme de république oligarchique apparaît en Étrurie, dans laquelle les plus importants

postes religieux et politiques sont occupés à tour de rôle par des membres des grandes familles, les *gentes*. Rien d'étonnant à cela : la plupart des sociétés méditerranéennes du V^e siècle avant notre ère avaient adopté ce type de société qui, du reste, ressemble beaucoup à la *Polis* grecque.

L'origine des Étrusques reste mystérieuse. L'historien grec Hérodote (484-420 avant notre ère) écrivit que les Étrusques descendaient des Lydiens : une partie de ce peuple d'Asie mineure, poussée par la famine, aurait été emmenée en Italie par Tyrrhénus, personnage dont le nom serait à l'origine du nom grec des Étrusques. L'historien grec Denys d'Halicarnasse, au tournant de notre ère, voyait plutôt dans les Étrusques un peuple italique ancien. D'autres auteurs les faisaient plutôt provenir d'au-delà des Alpes. Quoiqu'il en soit, tous s'accordaient à dire que leur langue et leur religion les distinguaient fortement de leurs voisins italiques.

On considère aujourd'hui que chacune de ces trois théories de l'origine des Étrusques contient une part de vérité, mais une part seulement. La synthèse des données archéologiques suggère plutôt que la culture étrusque s'est forgée par amalgame de traits culturels d'origines diverses, processus qui se serait poursuivi jusque vers 700 avant notre ère. Massimo Pallotino, de

l'Université de Rome, qui est l'un des principaux partisans de cette théorie, souligne la continuité de l'occupation humaine dans la région correspondant à l'Étrurie, depuis le début de l'âge du Bronze (II^e millénaire avant notre ère) jusqu'à l'âge du Fer avec la culture de Villanova (1000 à 700), dont on pense qu'est issue la culture étrusque. Ce modèle d'ethnogenèse est compatible avec l'idée d'Étrusques enracinés dans un peuple italique ancien, sans exclure l'apport d'influences extérieures – apport qui expliquerait certains éléments archéologiques tels que l'introduction à la fin de l'âge du Bronze de la coutume nord-alpine des sépultures à incinération ou encore l'importation d'objets et de traditions artisanales d'Asie mineure ou de Grèce.

Depuis quelques années, les partisans des trois théories tentent de les renforcer par des arguments génétiques. Ainsi, en 2007, la comparaison des gènes d'habitants du village toscan de Murlo, fondé par les Étrusques au VII^e siècle avant notre ère, avec ceux de Proche-Orientaux a indiqué une parenté. En 2013, sur la base de 150 échantillons de gènes d'Anatoliens, l'équipe de Silvia Ghirotto, de l'Université de Ferrare en Italie, a estimé que la migration suggérée par la parenté proche-orientale des habitants de Murlo, si elle a eu lieu, remonte à plus de 5000 ans...

Par ailleurs, en comparant les gènes de 30 Étrusques, de 27 Toscans médiévaux et de 370 Toscans d'aujourd'hui, les généticiens ont établi l'existence d'une certaine continuité entre les habitants de

la Toscane antique et une petite partie de ceux de la Toscane actuelle.

Pour S. Ghirotto, le groupe étrusque s'est bien constitué sur le territoire de l'Étrurie. Pour autant, une parenté génétique le relie aux habitants d'Europe centrale, particulièrement à ceux du Sud de l'Allemagne, et suggère qu'une migration a eu lieu. Quoi qu'il en soit, la biologie ne livre pas automatiquement la réalité historique. Les données et les statistiques qu'elle produit, aussi solides soient-elles, doivent être placées dans le contexte archéologique.

Inscriptions votives

En 1964, l'une des plus grandes découvertes de l'archéologie étrusque eut lieu dans le sanctuaire de Pyrgi, l'ancienne agglomération portuaire de Caeré. Des archéologues romains y mirent au jour trois inscriptions sur feuilles d'or. Ces *ex-voto* proclamant une offrande à la divinité étaient probablement clouées sur les portes ou les colonnes de bois du temple. Tandis que deux d'entre elles étaient rédigées en étrusque, la troisième l'était en phénicien. Or les épigraphistes parvinrent à montrer que le texte phénicien correspond à l'un des textes étrusques !

Le phénicien étant déchiffré, on a pu prendre connaissance du sens de l'une des inscriptions étrusques : celle-ci proclame que le souverain de Caeré a consacré un temple et une statue à la déesse Uni. Malheureusement trop courte pour faire office de pierre de Rosette étrusque, elle a tout de

L'AUTEUR



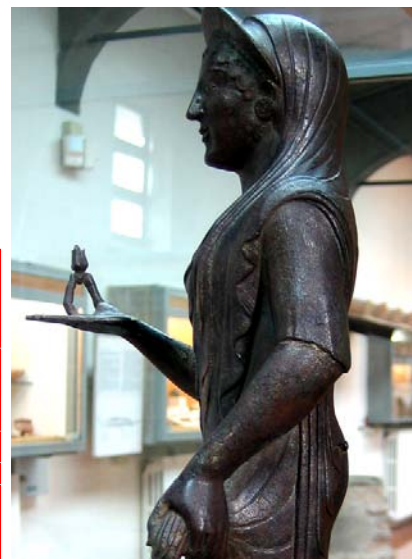
Martin BENTZ est archéologue à l'Université de Bonn, en Allemagne. Ses recherches

portent sur les cultures étrusque et grecque.



LA CULTURE FUNÉRAIRE TÉMOIGNE de l'importance qu'attachaient les Étrusques à la vie domestique. On sculptait les tombes troglodytes en forme de maison (ci-dessus, à Cerveteri), et l'on représentait sur les sarcophages les membres de la famille allongés au banquet (ci-dessous).





UNE SOURCE SACRÉE, au Nord-Est de Kainua, était recouverte par un édifice de 9 mètres par 7,5 abritant une vasque, d'où l'eau s'écoulait par un canal. À quelque distance, des socles de statues signalent une aire où l'on faisait des demandes de grâce à la divinité (*ci-dessus*). L'un des ex-voto retrouvés est une statuette de bronze d'une femme tenant un bourgeon de fleur dans la main droite et un pan de son chiton (habit) dans la main gauche (*à droite*). De style grec, elle représente peut-être Taran, l'Aphrodite étrusque.

même clarifié le sens de nombreux mots. Le bilinguisme pratiqué à Pyrgi témoigne aussi des relations étroites qu'entretenaient les Étrusques avec des Phéniciens, dont Carthage était une importante colonie en Méditerranée occidentale.

Depuis cette découverte, le corpus des inscriptions étrusques s'est enrichi jusqu'à compter aujourd'hui des milliers d'inscriptions, datant du VIII^e siècle tardif jusqu'au II^e siècle. Puisque l'alphabet étrusque dérive de l'alphabet grec, on sait les lire et souvent les comprendre. Une grande partie d'entre elles provient de l'ornementation peinte des tombes, les Étrusques ayant l'habitude d'y inscrire les noms des défunts, de leurs père et mère, leurs origines et leurs âges. Les inscriptions votives destinées à préciser dans quel but un objet était offert à la divinité constituent une autre grande classe d'inscriptions.

L'étrusque, une langue non indo-européenne

Les difficultés d'interprétation concernent surtout les rares textes étrusques longs, car ils contiennent des mots et des expressions n'apparaissant nulle part ailleurs. Dans la plupart des cas, le contexte est clair: il s'agit de formules rituelles, de calendriers de fêtes ou de contrats. Un exemple célèbre est fourni par les bandelettes de Zagreb, un manuscrit inscrit en étrusque sur une toile de lin, qui a servi à envelopper une momie égyptienne aujourd'hui conservée à Zagreb. Ce texte est composé de 1 200 mots et porte sur les festivités d'une ville étrusque inconnue. Autre exemple: la table de Cortone

(*Tabula cortonensis*) est un contrat de vente de terrain couché en quelque 200 mots.

Même s'il existait des textes assez longs, les Étrusques ne produisaient ni textes littéraires ni textes d'histoire. En revanche, les longs textes religieux devaient être abondants, mais ils ne sont connus que par les mentions romaines.

On n'a pas déchiffré complètement l'étrusque, mais on en sait assez pour savoir qu'il ne s'agit pas d'une langue indo-européenne, ce qui relance l'énigme de l'origine de la culture étrusque. Des recherches de linguistique comparative montrent que les liens avec le grec ou avec les langues italiques voisines ne concernent pas la structure de la langue et se limitent au vocabulaire.

Les fouilles menées par l'Université de Pérouse à Gravisca, l'agglomération portuaire de Tarquinia, illustrent l'importation d'idées et donc de mots dans la culture étrusque. Les archéologues ont identifié des produits d'importation de Phénicie, d'Égypte, de l'Est de la Grèce, de Sparte, de Corinthe et d'Athènes. Une ancre de pierre marquée du nom d'un certain Sostratos, originaire de l'île d'Égine face à Athènes dans le golfe Saronique, et des inscriptions retrouvées dans le sanctuaire du port attestent de la présence de Grecs.

Ces constatations illustrent que les Étrusques jouaient un grand rôle dans les échanges au sein de l'espace méditerranéen des VII^e et VI^e siècles avant notre ère. Comme les Phéniciens et les Grecs, ils se livraient à un intense commerce maritime au long cours, qui faisait passer des biens et des idées d'un pays

BIBLIOGRAPHIE

F. Savatier, *Un village gallo-étrusque à Lattes*, actualité *Pour la Science*, 2010 : <http://bit.ly/1AFvtKR>

M. Bentz et C. Reusser, *Marzabotto. Planstadt der Etrusker*, Philipp von Zabern, 2008.

E. Govi, *Marzabotto una città etrusca*, Ante Quem, 2007.

J.-P. Thuillier, *Les Étrusques*, Éditions du Chêne, 2006.

Un grand bâtiment, que Denis Lebeaupin et ses collègues du centre archéologique de Lattara ont fouillé dans ce site situé à Lattes près de Montpellier, illustre la disparition prématurée du seul comptoir étrusque du Sud de la Gaule.

Autour de l'étang du Méjean, au Sud de Montpellier, deux sites archéologiques majeurs illustrent l'apparition d'un *emporion*, c'est-à-dire d'un port de commerce, mais aussi sa disparition rapide. En effet, au cours du VI^e siècle avant notre ère, des marchands méditerranéens – grecs, étrusques, ibères, carthaginois, etc. – sont venus commercer dans un gros village gaulois établi non loin de la rive de la lagune, au lieu-dit la Cougourlude à Lattes. Le passage des marchands d'outre-mer y est attesté par de nombreux restes de poteries

étrangères, dont de la fine vaisselle à boire attique (d'Athènes), des amphores massaliotes (grecques) et de nombreuses amphores étrusques accompagnées de *bucchero nero*, vaisselle en terre cuite noire d'invention étrusque. Cette forte présence de la poterie étrusque suggère un ascendant de ce peuple sur les échanges. Il se traduit au début du V^e siècle par la construction d'une nouvelle agglomération portuaire.

Cette ville, dont le nom

Lattara est connu par des textes plus tardifs, a la forme d'un triangle limité par deux bras du

Lez, le troisième côté donnant sur l'étang, donc sur le port. Couvrant près de quatre hectares, elle est ceinte d'un rempart. Le rôle majeur des Étrusques dans la fondation de cette ville est attesté par la prédominance de leurs importations, par la présence de leur vaisselle et par nombre d'inscriptions en alphabet étrusque. On ne peut que difficilement imaginer que les Étrusques, qui n'étaient que des hôtes en Gaule du Sud, aient pu rassembler la pierre, le bois et la force de travail nécessaires à la construction de cette ville sans l'assentiment et l'aide des locaux. Du reste, un oppidum gaulois, donc un centre de pouvoir, se trouve à huit kilomètres de là...

Situé au Sud de la ville, l'îlot de la zone 27 consiste en un grand bâtiment d'une vingtaine

de mètres de long et d'une dizaine de pièces, qui a pu abriter trois unités d'habitation. Il a été érigé sur des fondations de pierres soigneusement agencées, les murs étant en briques de terre crue et le toit sans doute en chaume de roseau. Des pans entiers de murs ayant été retrouvés effondrés d'un bloc, nous savons que ce bâtiment avait une hauteur d'au moins cinq mètres.

Les archéologues ont du mal à déterminer les fonctions de ce bâtiment imposant érigé à grands frais, qui semble être resté largement inutilisé. En dehors d'une soixantaine d'amphores, pour la plupart vides, et d'un peu de vaisselle, les pièces ne contiennent que de modestes traces de vie : un seul foyer, quelques fragments d'os, de rares morceaux de métal. Il semble que la maison n'a été habitée que quelques années, voire beaucoup moins...

Vers 475 en effet, une brèche est ouverte dans le rempart et le bâtiment détruit par un incendie, comme d'ailleurs une grande partie de la ville. Par la suite, le site est réoccupé, mais surtout par des locaux.

Qui a fait disparaître la Lattara

étrusque en plein développement ? Les fouilles ne l'ont pas indiqué, mais on sait que le « crime » a profité aux Grecs massaliotes, qui n'ont pas tardé à imposer leur commerce dans la région. Mécontents de la concurrence étrusque, les Marseillais auraient-ils saccagé cet *emporion* rival peu après qu'en 474, les Grecs de Syracuse avaient pris le dessus sur les Étrusques dans un combat naval au large de Cumes ? On peut aussi envisager l'action de dirigeants gaulois, qui, soucieux de maîtriser le commerce extérieur pour mieux le taxer, ont pu vouloir ruiner le réseau étrusque, sur le point de prendre son indépendance.

— François Savatier



à l'autre. Les ressources naturelles de l'Étrurie, à commencer par son minerai de fer, en faisaient un partenaire commercial important. Des artefacts grecs et des inscriptions attestent de la présence et de l'assimilation de Grecs et de Phéniciens dans les villes étrusques.

Pour leur part, les élites étrusques raffolaient de luxe importé. L'ambre de la Baltique, les peintures funéraires réalisées avec du bleu égyptien, les récipients en métaux nobles ainsi que les sculptures sur ivoire du Levant en témoignent et montrent l'ampleur du réseau d'échanges étrusque. Du reste, le fort goût étrusque pour les produits de luxe avait suscité la venue en Étrurie d'artisans étrangers et la création d'ateliers locaux imitant les coûteux produits d'importation.

L'habitude de manger couché fournit un exemple d'arrivée en Étrurie d'une nouvelle coutume par le commerce. Cette coutume surprenante a été importée de Grèce au VI^e siècle avant notre ère. Elle s'est vite propagée chez les aristocrates, comme en attestent tant de représentations sur sarcophage (voir les figures pages 39 et 41). Du reste, a fait remarquer Christoph Reusser de l'Université de Zurich, les Étrusques de condition modeste aussi adoraient la céramique grecque. Le goût du luxe et la tendance à adopter des traits culturels grecs étaient fréquents en Étrurie.

Jusqu'à récemment, les chercheurs ont interprété ces relations comme de l'acculturation, c'est-à-dire comme des

Les siècles étrusques

XIII^e siècle

Arrivée des Lydiens, selon la légende.

IX^e au VIII^e siècles

Culture de Villanova, ancêtre de la culture étrusque.

VII^e siècle

Les Étrusques pratiquent une culture orientalisante.

VI^e siècle

Âge d'or de la civilisation et du commerce étrusques.

VI^e au IV^e siècles

Les Romains prennent ville sur ville en Étrurie.

I^{er} siècle

L'Étrurie devient la VII^e région romaine.

cas d'adoption de traits culturels d'une société avancée par une société qui l'est moins. Aujourd'hui, ils sont plus neutres et se contentent d'étudier les contacts inter-culturels et d'analyser leurs effets sur les identités locales. Les traditions locales n'étaient pas abandonnées pour des traditions d'importation, comme cela se voit par exemple dans l'habillement. On les combinait plutôt avec des traits culturels importés, ce qui se traduit par exemple dans les styles de la céramique étrusque.

Kainua, abandonnée à l'arrivée des Celtes

Comme pour beaucoup de sociétés de l'Antiquité, la vie quotidienne étrusque et les questions de société qui lui sont liées restent énigmatiques. Malheureusement, les villes et les villages étrusques ont été le plus souvent recouverts par des constructions romaines et médiévales, voire modernes, de sorte que leur étude est difficile. Les seuls sites étrusques que les archéologues peuvent fouiller dans leur contexte sont les nécropoles, puisqu'elles étaient installées hors des agglomérations.

Il existe une exception rare : la ville de Kainua, qui a été abandonnée au IV^e siècle avant notre ère lors de la conquête de la région par le peuple celte des Boïens. Les archéologues l'étudient donc le plus méticuleusement possible.

Située dans la commune de Marzabotto non loin de Bologne, Kainua se trouve sur un plateau dominant le fleuve Reno. Entourée d'un rempart, elle a été dotée au milieu du VI^e siècle avant notre ère d'un quadrillage de rues rectilignes, qui n'a plus évolué. Ce plan en damier suggère que les habitants de Kainua imitaient la planification urbaine grecque. Après 150 ans de prospérité, Kainua fut brusquement abandonnée à l'arrivée des Celtes.

Au Nord de la ville se trouvaient les cinq temples et les cinq autels de plein air constituant les sanctuaires, qui dominaient la ville depuis l'acropole (« ville haute » en grec). On a aussi découvert en dehors de l'enceinte un endroit où se trouvaient des dizaines de bases de pierre taillée, que les archéologues ont identifiées comme les bases de statues servant d'ex-voto (d'offrande aux dieux) dans l'aire rituelle d'une source sacrée, où l'on venait vénérer des nymphes. Ces divinités féminines mineures animaient



LES FONDATIONS DE LA MAISON 6 du bloc [isola] 1 de la zone 4 de Kainua illustrent le caractère géométrique de l'architecture étrusque. Ce caractère était aussi sensible dans le plan en damier appliqué pour organiser la ville, schéma qui suggère une influence grecque.

la nature, croyaient les Anciens, qui les associaient à des lieux et des phénomènes naturels tels qu'une source ou un fleuve. Les archéologues ont retrouvé un ex-voto intact : une statuette de 30 centimètres de haut représentant une femme habillée avec recherche. Le bourgeon qu'elle présente de sa main droite est un symbole connu de fécondité (voir la figure 42).

Par ailleurs, l'équipe de Giuseppe Sassatelli, de l'Université de Bologne, a découvert le temple central de la ville, celui du « Zeus étrusque » – le dieu Tinia. Son concept architectural – un temple entouré sur ses quatre faces de colonnes – est typiquement grec. Cependant, chaque colonne ne reposait pas sur un fondement maçonné, comme c'était l'usage en Grèce, mais sur une assise de galets de rivière. Sans doute en bois, les colonnes supportaient un toit de grosses tuiles, dont certaines étaient peintes.

L'économie de Kainua reposait surtout sur le commerce et l'artisanat, mais peu sur l'agriculture, qu'il était difficile de développer dans l'étroite vallée fluviale surmontée par la ville. Alors que c'était fréquent dans les villes antiques, la ville ne disposait pas de quartiers d'artisans, mais on y retrouve partout les traces d'une production de céramiques et d'objets en bronze. Les ateliers correspondants se trouvaient pour la plupart dans les maisons d'habitation.

Il n'y avait pas d'*agora*, c'est-à-dire de place de marché, alors que cela faisait partie de l'équipement public de toute ville grecque ou romaine qui se respecte. Comme on n'en a encore jamais retrouvé dans une agglomération étrusque, on suppose que les rues servaient d'espace public. De fait, à Kainua, les rues principales font plus d'une quinzaine de mètres de large. Comme cela dépasse de loin la largeur des voies dans les villes des autres cultures antiques, cela s'accorde bien avec l'idée que la voie publique étrusque servait aussi de place publique...

Quant à la connaissance des espaces d'habitation, elle a avancé avec les fouilles que Christoph Reusser et moi avons conduites à Kainua. Ces travaux ont mis en évidence que la maison étrusque est l'ancêtre de la maison romaine. Nous avons en effet établi la présence à Kainua de la *domus à atrium*, c'est-à-dire de la maison typiquement... romaine, bien connue à



LA MAISON À ATRIUM, typiquement étrusque, était organisée autour d'un espace à ciel ouvert – l'atrium – autour duquel sont réparties les pièces de la maison. Adoptée par les Romains, cette architecture se retrouve par exemple dans les maisons de Pompéi.

Rome ou à Pompéi. Déjà présente à Kainua, la *domus à atrium* n'apparaîtra dans les agglomérations de la République que 100 à 150 ans après la fin de la ville étrusque... Une *domus à atrium* est caractérisée par l'enfilade d'une pièce centrale, l'*atrium*, et d'une pièce de réception, le *tablinum*. Placé dans l'axe de vision de l'atrium, le *tablinum* servait à recevoir des visiteurs. Autour de l'axe *atrium-tablinum*, dans les

Les fouilles de Kainua ont révélé que la maison étrusque est l'ancêtre de la maison romaine.

atiae, c'est-à-dire les *atiles*, on plaçait les portraits des aïeux, habitude que reprendront les Romains.

Les maisons à *atrium* de Kainua sont à peu près deux fois plus grandes que les maisons sans *atrium* de la ville. En outre, elles se trouvent toutes à proximité du grand temple. On considère donc que leurs occupants faisaient partie de l'élite de Kainua, dont les membres étaient les seuls à avoir besoin de pièces ostentatoires pour y recevoir leur clientèle (l'ensemble des protégés de la maison), y régler leurs affaires et afficher

l'importance de leur famille. Cette utilisation des espaces privés était complètement étrangère aux Grecs, qui se rendaient sur une *agora* ou dans un édifice public pour y régler des affaires publiques. Il semble donc qu'il s'agisse là d'un trait culturel étrusque que les Romains ont ensuite adopté.

Entre-temps, d'autres agglomérations étrusques accessibles aux fouilles ont été découvertes, qui vont nous aider à restituer la vie étrusque. Quant aux fouilles de sanctuaires, elles confirment ce qu'en disaient les auteurs grecs et romains : chez les Étrusques, la religion jouait un rôle central.

Le *Fanum Volumnae*, le sanctuaire fédéral des Étrusques évoqué au début de cet article, avait ainsi une importance énorme dans la vie des peuples étrusques, et pas seulement parce que les envoyés des cités étrusques s'y rencontraient chaque année. Sans doute jouait-il un rôle comparable à Delphes ou Olympie chez les Grecs.

Même si la plupart des sanctuaires étrusques ont été abandonnés à l'époque romaine, S. Stopponi a pu montrer que le *Fanum Volumnae* a été utilisé jusqu'à la fin de l'Antiquité. Du reste, et sans doute n'est-ce pas un hasard, une église chrétienne y a été érigée sur l'emplacement de l'un des vieux temples étrusques... ■

DES TOURBILLONS pour mieux nager

Frank Fish et George Lauder

Poissons, dauphins ou méduses se propulsent dans l'eau avec aisance. Comment font-ils ? En visualisant les écoulements, les scientifiques révèlent les divers effets hydrodynamiques en jeu.

Un dauphin ou un poisson fend les flots vite et sans efforts apparents. Quels sont les secrets de la nage de ces animaux aquatiques ? Cette nage est soumise aux lois de l'hydrodynamique, qui dictent la façon dont l'eau s'écoule autour de l'animal et déterminent l'énergie requise au déplacement dans le fluide.

Or l'évolution a équipé les animaux aquatiques de moyens variés pour contrôler l'écoulement ambiant et celui qu'ils créent en se propulsant. Afin d'étudier ces étonnantes capacités des animaux nageurs et essayer de les transposer à des systèmes artificiels, nous nous sommes entourés de physiciens et d'ingénieurs. Comme nous le verrons, nos observations, notamment sur des poissons et des alligators, révèlent plusieurs effets hydrodynamiques mis à profit dans la nage des animaux.

Il y a encore 20 ans, on se contentait de penser l'écoulement autour d'un animal qui nage plutôt que de tenter de le visualiser. Comme il fallait simplifier, les représentations de l'interaction de l'animal avec l'écoulement reposaient sur quelques formes profilées et autres ailes artificielles aux surfaces ondulées ou lisses. Cependant, les nageurs réels présentent des formes

L'ESSENTIEL

■ **L'étude de la nage**
des animaux aquatiques nécessite de visualiser l'écoulement qu'ils créent autour d'eux.

■ **Plus la poussée est importante et la traînée hydrodynamique réduite, plus la nage de l'animal est efficace.**

■ **La forme du corps**
mais aussi la structure fine de la peau influent sur les performances de la nage.

■ **Les modes de propulsion**
sont variés, mais tous se traduisent par la production de jets de fluide et d'anneaux tourbillonnaires.

variées et plus ou moins complexes. Leurs mouvements influencent donc la dynamique de l'écoulement de façons qui n'avaient pas été envisagées. En outre, l'étude de la nage est compliquée par le fait que les animaux changent de forme en se mouvant.

C'est pourquoi les biologistes se sont mis à étudier la nage des animaux en utilisant les mêmes techniques que celles développées par les ingénieurs pour visualiser les écoulements. Une méthode consiste à introduire du colorant à la surface du fluide ou dans le sillage d'un animal nageur, de façon à pouvoir enregistrer de façon continue les trajectoires suivies par les éléments de liquide (voir la figure ci-contre).

Visualiser les écoulements

Une autre méthode très utilisée est la vélocimétrie par images de particules. Elle consiste à mêler à l'écoulement de nombreuses petites particules réfléchissantes, éclairées dans un plan par un feuillet de lumière laser. En exploitant par ordinateur les images, enregistrées par des caméras rapides, on peut reconstituer les vitesses et directions de l'écoulement dans une



région bi- ou tridimensionnelle autour de l'animal. Une autre méthode encore consiste à visualiser une simulation informatique, réalisée à l'aide de programmes résolvant numériquement les équations de Navier-Stokes, c'est-à-dire les équations de la mécanique des fluides qui régissent l'écoulement de l'eau.

Méduses, poissons ou cétacés, tous les animaux nageurs se propulsent en créant une poussée à laquelle s'oppose une traînée, c'est-à-dire une résistance qu'oppose le fluide au mouvement. Lorsque la vitesse de nage est constante, la poussée et la traînée s'équilibrent. Pour nager vite ou diminuer son effort, un animal doit tendre à réduire la traînée et à augmenter la poussée. Lorsqu'un nageur déplace de l'eau, il lui transfère une partie de son énergie cinétique (l'énergie associée à son mouvement); par ailleurs, la traînée dissipe une partie de l'énergie cinétique de l'animal, ce qui le ralentit.

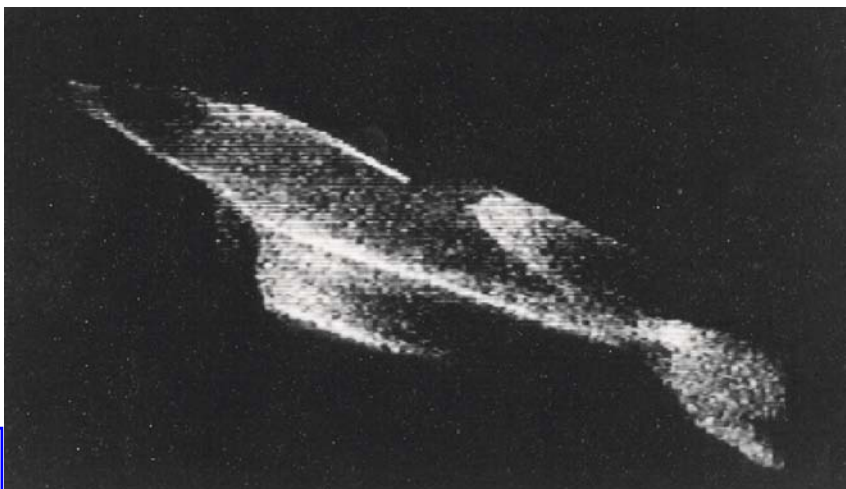
Poussée contre traînée

La traînée est produite par le frottement de l'eau sur le corps (traînée de frottement) et par la pression du fluide (traînée de forme). La traînée de frottement résulte de la friction entre la peau et la couche limite, la toute première couche de fluide proche de l'animal en mouvement. Au sein de cette couche, le comportement du fluide est dominé par sa résistance au glissement, c'est-à-dire par sa viscosité. Sous la couche limite, au contact immédiat de la surface de l'animal, cette résistance empêche le mouvement du fluide, qui reste immobile par rapport à la peau.

Tout se passe comme si la couche limite était un empilement de feuillets glissant d'autant plus les uns sur les autres qu'ils sont éloignés de la surface, exactement comme les cartes d'une pile que l'on pousse par la tranche glissent d'autant plus qu'elles sont éloignées de la table (la première restant immobile). Nommé cisaillement, ce type de déformation du fluide est dû au mouvement relatif de l'animal et du milieu dans lequel il se déplace. Ce cisaillement de la couche limite contribue aux pertes d'énergie liées à la traînée.

Le mucus présent sur le corps des poissons a pour effet de réduire la traînée due au frottement. Il est constitué d'un mélange de lipides et de protéines dont beaucoup forment de longues chaînes de molécules. Certaines de ces molécules sont

LES OMBRELLES PULSATILES des méduses envoient vers le bas des jets d'eau qui forment un sillage turbulent, visualisé ici à l'aide de colorants. L'agitation des eaux marines due aux mouvements des animaux nageurs contribuerait de façon notable au brassage des océans.



LA SILHOUETTE LUMINEUSE DE CE GRAND DAUPHIN (*Tursiops truncatus*) est créée par du plancton luminescent. L'intense cisaillement du fluide, aux endroits où il y a décollement de la « couche limite » de l'écoulement, provoque l'émission de lumière par le plancton. La micro-turbulence à l'origine de la luminescence est forte sur les bords des nageoires et dans le sillage.

Léonard de Vinci et le profil des poissons

L'observation de l'écoulement autour d'un animal aquatique remonte à Léonard de Vinci. Il fut le premier à identifier les avantages procurés au poisson par sa forme profilée. Il affirma que le poisson peut se déplacer dans l'eau sans rencontrer beaucoup de résistance – donc en ne développant qu'une faible traînée –, car grâce à sa forme, l'eau s'écoule plus régulièrement autour de lui.

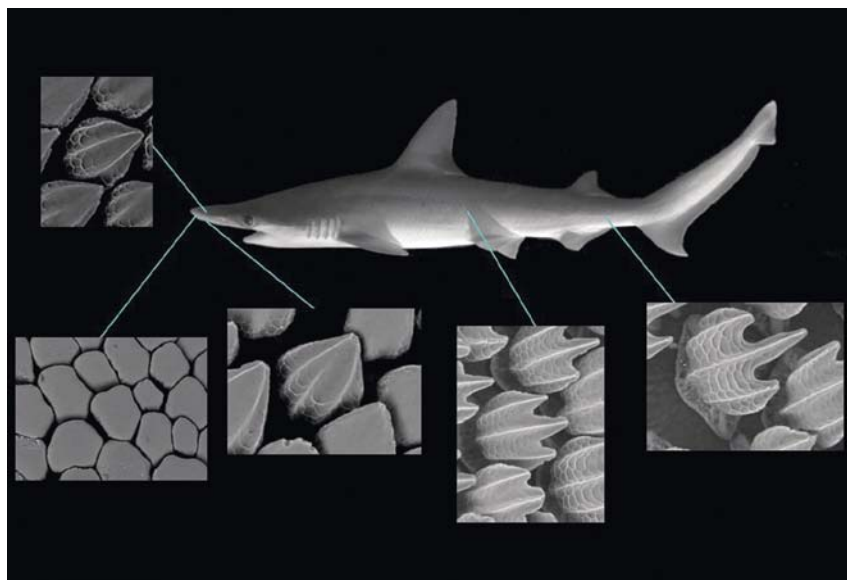
tensio-actives, c'est-à-dire qu'elles réduisent la tension superficielle du fluide. Or depuis la fin des années 1940, les ingénieurs navals ont établi que l'ajout à l'écoulement de solutions diluées de polymères à longues chaînes réduit efficacement la traînée de frottement. De même, le mucus enrobant le corps des poissons réduit la viscosité du fluide dans la couche limite. Par exemple, le mucus du barracuda (*Sphyrna argentea*), réduit de 66 % la traînée de frottement, de sorte que ce poisson est capable de pointes à 40 kilomètres par heure.

L'autre type de traînée, la traînée de forme, découle de la chute de pression entre l'avant et l'arrière du corps. Son origine se comprend aisément à l'aide du principe de Bernoulli. Publiée en 1738 par le Suisse Daniel Bernoulli, cette loi de l'hydrodynamique stipule que la pression et (le carré de) la vitesse varient en sens inverses l'une de l'autre : quand l'une augmente, l'autre diminue et *vice-versa*. Ainsi, là où le fluide entre en contact avec la partie antérieure du corps, l'écoulement ralentit et la pression augmente ; ce phénomène est facile à observer quand, assis dans un bateau, on plonge sa main dans l'eau.

Le fluide doit ensuite longer le corps. Il accélère et sa pression diminue, jusqu'à ce que le fluide atteigne l'arrière du corps. À cet endroit, la pression du fluide réaugmente, mais pas autant qu'elle avait augmenté à l'avant ; on a donc une différence de pression entre l'avant et l'arrière du corps, dont résulte la traînée de forme.

Empêcher le décollement de la couche limite

Plus le sillage est large, plus la traînée de forme est importante. Les sillages larges résultent d'une forte interaction des variations de pression avec la couche limite. Quand la couche limite a une énergie cinétique insuffisante, les changements de pression peuvent entraîner



LA FORME DES DENTECULES D'UN REQUIN varie suivant l'endroit de la peau considéré, même si la structure rainurée à trois pointes est présente presque partout (*ici des denticules d'un requin-marteau tiburo, Sphyrna tiburo, vus au microscope électronique*). Ces denticules réduisent la traînée hydrodynamique lors de la nage. Ils augmenteraient aussi la poussée de l'animal.

son décollement de la surface du corps. Là où cela se produit, des tourbillons se forment et élargissent le sillage. La traînée est donc réduite si la couche limite reste attachée à la surface du nageur.

Si la forme des poissons, des cétacés ou des sous-marins est celle d'une larme étirée, ce n'est pas un hasard. Ce type de profil sélectionné au fil de l'évolution confère le minimum de traînée pour un volume donné. Il minimise les différences de pression et facilite donc l'adhérence de la couche limite, ce qui maintient un sillage étroit. Des images réalisées sur des dauphins par Jim Rohr et Michael Latz, du Spawar (*Space and Naval Warfare Systems Center*) à San Diego aux États-Unis, l'illustrent (voir la figure page ci-contre, en haut). Les contraintes de cisaillement au sein du fluide perturbent le phytoplancton, qui réagit en émettant de la lumière. Sur le corps profilé, le cisaillement de la couche limite est faible, d'où une émission lumineuse minime; en revanche, sur les arêtes et les bords de fuite des nageoires, là où le cisaillement est bien plus fort, l'émission lumineuse est intense.

Au vu de ce que nous avons expliqué, on pourrait croire qu'une peau lisse réduit la traînée. Pourtant, le contraire peut aussi être vrai, comme l'atteste la peau rugueuse des requins. Pourquoi? *A priori*, les aspérités d'une surface microstructurée créent de la turbulence, qui augmente la traînée de frottement. Toutefois, les microtourbillons ont aussi pour effet de communiquer de l'énergie cinétique à la couche limite. Cette énergie aide cette dernière à surmonter les sauts de pression et la stabilise: il y a moins de risques de décollement de la couche limite, qui augmenterait la traînée de forme.

Des denticules sur la peau

Le même phénomène explique pourquoi les balles de golf présentent des alvéoles: la turbulence qu'elles engendrent près de la surface a pour effet de retarder le décollement de la couche limite, ce qui atténue leur sillage. Pour cette raison, ces balles alvéolées volent plus vite et plus loin.

Les poissons présentent à leur surface toute une variété de structures complexes qui pourraient agir de façon similaire aux alvéoles des balles de golf. Par exemple, le rostre de l'espéron (*Xiphias gladius*)

est couvert de petits creux et bosses susceptibles d'engendrer de la turbulence dans la couche limite. Bien que peu de recherches aient été effectuées sur le rôle hydrodynamique de ces structures, les spinules et autres denticules qui tapissent de nombreux poissons osseux modifient sans doute l'écoulement dans la couche limite de façon à réduire la traînée.

Pour sa part, la structure remarquable de la peau des requins (des «poissons» cartilagineux) est étudiée depuis de nom-

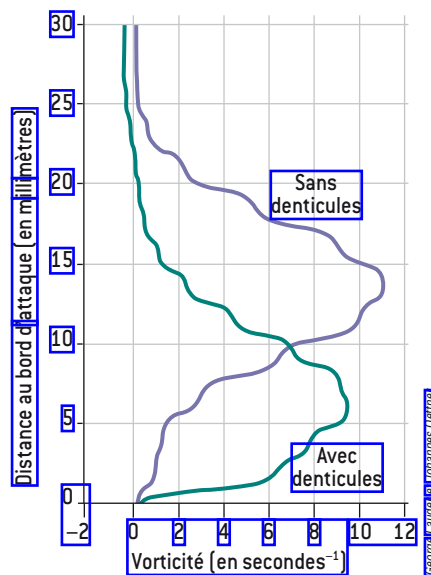
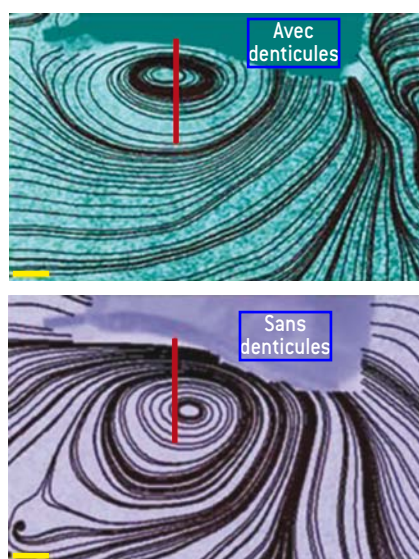
Les denticules de la peau créent de la turbulence dans la couche limite et diminuent la traînée.

breuses années. Cette peau présente un réseau serré de denticules, de «petites dents» faites de dentine recouverte d'émail et même dotées d'une cavité pulpaire, exactement comme nos dents. La plupart de ces denticules ont trois crêtes, suffisamment saillantes pour atteindre la couche limite et se terminant par trois pointes dirigées vers l'arrière (voir la figure page ci-contre, en bas). La structure exacte des denticules varie selon l'espèce de requin et la région du corps considérées. Ainsi, dans le cas du

requin-marteau tiburo (*Sphyrna tiburo*), les denticules proches de la tête évoquent des pavés, tandis que les denticules proches de la queue sont surmontés de trois crêtes bien marquées et se terminant par de longues pointes.

Quelle est la fonction hydrodynamique de ces structures? L'étude en laboratoire d'un requin vivant n'étant pas facile, l'un de nous (G. Lauder) a conçu de petits robots imitant les mouvements de nage d'un tel animal. Pour l'essentiel, il s'agit d'un plan flexible imitant la queue qui ondule dans l'écoulement. Placé dans un bassin d'essai à recirculation, ce dispositif permet de mesurer les écoulements qui s'établissent sur des échantillons flexibles de peau munie ou non de denticules, dans des conditions proches de celles de la nage. Cette approche a révélé que la présence de denticules augmente notablement (de plus de 10%) la vitesse de nage. Le gain de vitesse observé résulte d'abord d'une diminution de la traînée due, pense-t-on, à la turbulence créée dans la couche limite par les denticules. Remarqué depuis des années, cet effet est très discuté, mais reste mal compris.

Plus étonnant, les données recueillies suggèrent aussi que la modification de l'écoulement par les denticules pourrait



LES TOURBILLONS FORMÉS PRÈS DE LA PEAU créent une aspiration qui contribue à la poussée quand la surface de l'animal aquatique (ici un requin mako) est assez courbée, par exemple sur un bord d'attaque. Cet effet diminue quand le tourbillon s'écarte de la surface (située en haut sur la figure), ce qui est davantage le cas si la peau est privée de denticules. Le graphique indique les valeurs de la vorticité, qui mesure la rotation du fluide, le long du segment marqué en rouge sur les images à gauche.

LES AUTEURS



Frank FISH est professeur de biologie et directeur du Laboratoire de la vie aquatique à l'Université West Chester, aux États-Unis.

George LAUDER est professeur de biologie des organismes et de l'évolution à l'Université Harvard, aux États-Unis.

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

contribuer à la poussée, effet qui n'avait jamais été soupçonné !

En visualisant l'écoulement autour de nos membranes flexibles de peau de requin, nous avons en effet découvert la présence de ce que l'on nomme un vortex de bord d'attaque, un tourbillon créé par la pénétration du bord avant de notre robot dans le fluide. Existe-t-il sur un requin ? Nous le pensons depuis qu'une simulation numérique a montré que le bord d'attaque de la queue entraîne un décollement de la couche limite, lequel s'accompagne de la création et de la propagation d'un vortex de bord d'attaque.

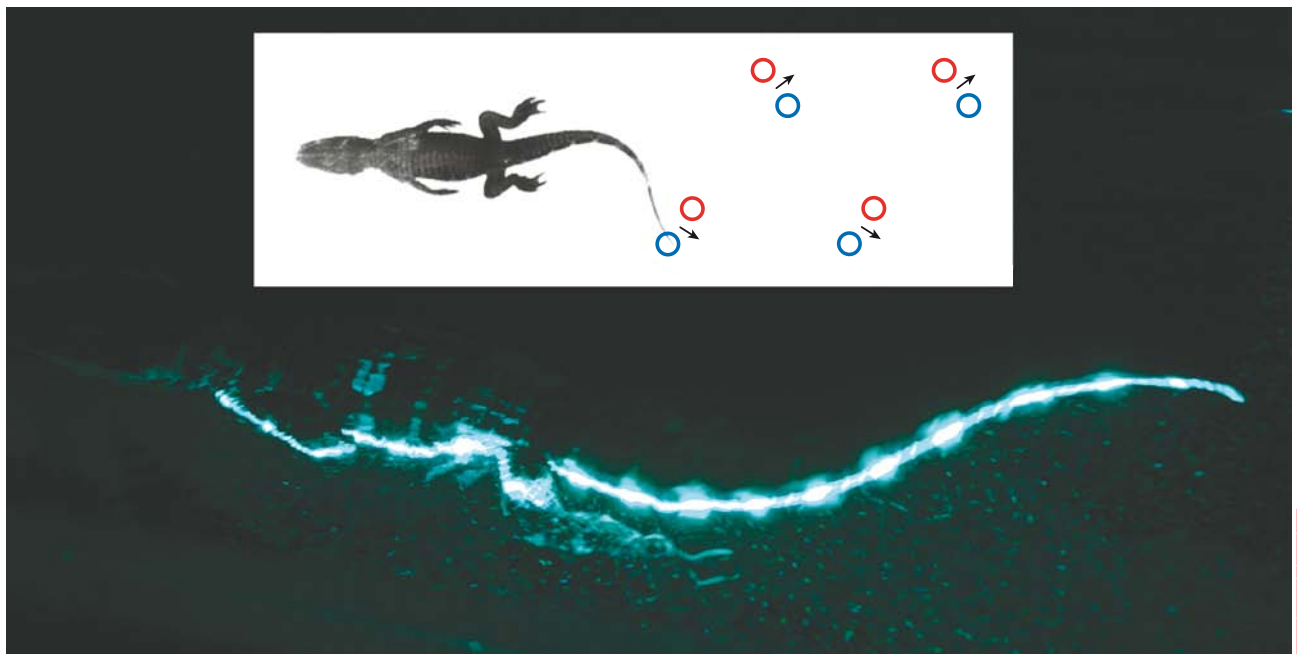
Or la région de basse pression que représente ce vortex crée une aspiration sur la peau, c'est-à-dire une force qui lui est perpendiculaire. Quand la peau se courbe vers l'avant, par exemple sous l'influence des battements de la queue, cette force développe une composante parallèle à l'axe du poisson et dirigée vers l'avant. Cette composante contribue donc à la poussée. Ce phénomène, qui concerne la région de la queue, pourrait jouer aussi partout où se produit un décollement de la couche limite, par exemple près des nageoires dorsale ou anale. Or nous avons observé qu'en l'absence de denticules, le vortex de bord d'attaque s'éloigne de la surface, ce qui diminue l'effet

d'aspiration et, partant, sa contribution à la poussée (voir la figure page 49).

Pour avancer, les animaux nageurs doivent accélérer vers l'arrière une masse de fluide. Ils y parviennent en exploitant les mouvements de leur corps et ceux de leurs nageoires et ailerons. Une fois créés, les écoulements correspondants prennent la forme d'anneaux tourbillonnaires traversés par un jet central, conformation que l'on retrouve dans les anneaux de fumée créés dans l'air par les fumeurs. John Dabiri, de l'Institut de technologie de Californie, et Ian Bartol, de l'Université Old Dominion en Virginie, ont injecté des colorants pour visualiser les éjections pulsatiles d'eau par lesquelles les méduses, les calmars ou les pieuvres se propulsent (voir la figure page 47). Les jets expulsés vers l'arrière par ces animaux produisent une série d'anneaux tourbillonnaires.

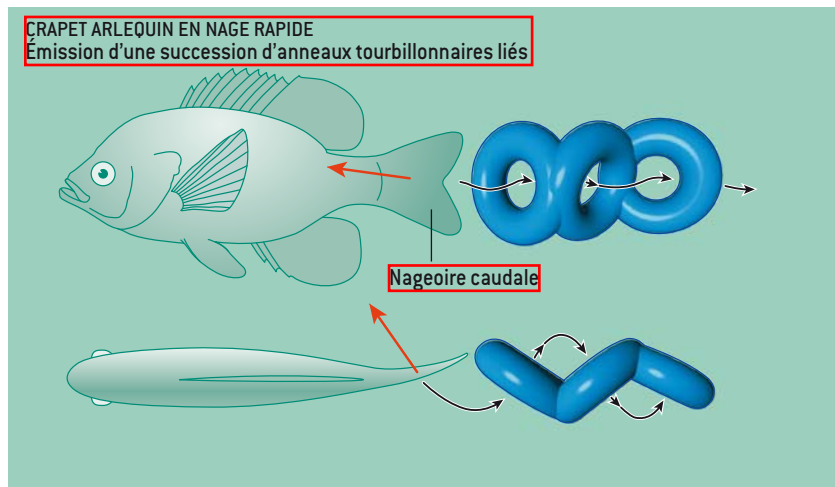
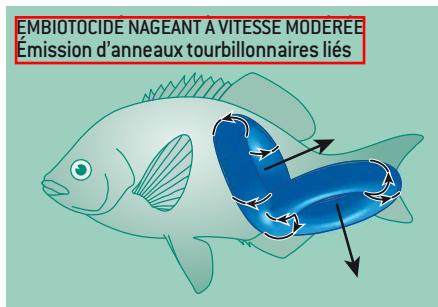
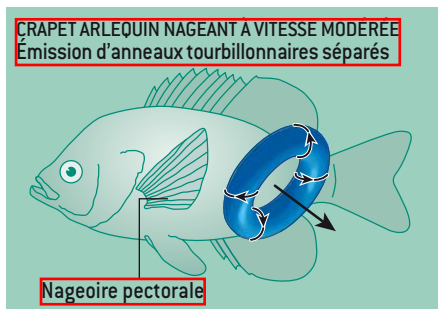
Émission d'anneaux tourbillonnaires

De même, on constate que le tortillement d'un poisson quand il nage produit une bonne partie de la rotation fluide – ce que l'on nomme la vorticité – observée dans son sillage. Par son mouvement, la nageoire caudale crée un anneau tourbillonnaire se



LE SILLAGE D'UN JEUNE ALLIGATOR (*en bas*) est révélé ici à l'aide de minuscules particules éclairées par un faisceau laser plan (vélocimétrie par images de particules). Cette technique d'imagerie montre que les battements de fouet de la queue de l'animal créent des paires de

tourbillons contrarotatifs s'éloignant en biais de l'animal (*en haut*). Ce mode de propulsion, moins efficace que celui des poissons, résulte sans doute d'un compromis fonctionnel : le reptile doit pouvoir non seulement nager dans l'eau, mais aussi marcher sur la terre ferme.



LE CRAPET ARLEQUIN ET LES EMBIOTOCIDÉS, une famille de poissons nord-américains du Pacifique, emploient différemment leurs nageoires pectorales. Les anneaux tourbillonnaires émis par le crapet arlequin sont séparés ; ceux d'un embiotocidé sont liés. Mais quand le crapet arlequin mobilise aussi sa nageoire caudale pour nager vite, il produit une chaîne d'anneaux tourbillonnaires liés. La flèche rouge indique la force de réaction exercée sur la queue.

propageant en biais par rapport à l'axe du poisson ; aussitôt que cet anneau s'éloigne vers l'arrière, un nouvel anneau tourbillonnaire est formé par le battement suivant de la nageoire caudale. Ces deux anneaux successifs se touchent. Les ondulations de la nageoire caudale organisent ainsi le sillage en une séquence d'anneaux tourbillonnaires se recouvrant partiellement et disposés en quinconce. Il en résulte un écoulement d'eau orienté en moyenne vers l'arrière, d'où une force de poussée qui compense la traînée (voir la figure ci-dessus).

Quand nous avons employé la vélocimétrie par images de particules pour visualiser le sillage créé par de jeunes alligators, une toute autre répartition des vortex est apparue. Les alligators nagent en ondulant latéralement, comme si leur corps était animé de vagues dont l'amplitude augmente à mesure qu'on se rapproche de la queue. On constate qu'à chaque demi-battement de queue, des paires d'anneaux tourbillonnaires contrarotatifs sont émises en biais vers l'arrière. Ces anneaux tourbillonnaires s'allongent à mesure que le fluide est entraîné par le mouvement de fouet de la queue. Dans le cas de la nage de jeunes alligators, les paires d'anneaux émises d'un côté du corps ne sont pas liées à celles émises de l'autre côté, au contraire de ce que l'on

observe dans le cas des poissons (voir la figure page ci-contre).

Pour une bonne propulsion et une efficacité énergétique optimale, la répartition et la périodicité des tourbillons de sillage doivent être contrôlées. La production d'un écoulement de jet efficace dans le sillage d'un poisson est possible pour un petit intervalle de valeurs du « nombre de Strouhal ». Ce nombre sans dimension (sans unité) a été défini pour décrire les écoulements oscillants, par exemple l'émission périodique de tour-

Les nageoires pectorales créent des paires d'anneaux tourbillonnaires associés à un jet central, orienté latéralement.

billons de sillage par un poisson. Dans la situation qui nous intéresse ici, le nombre de Strouhal est le produit de la fréquence d'émission des tourbillons par l'amplitude de déplacement de la nageoire caudale divisé par la vitesse de la nage.

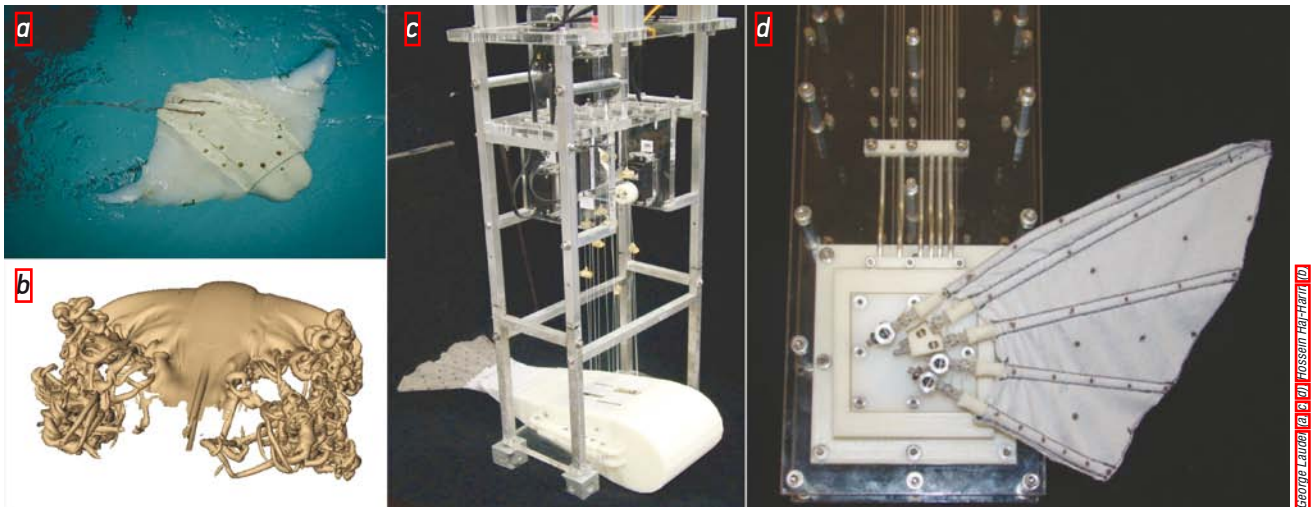
L'efficacité énergétique maximale correspond à un nombre de Strouhal compris entre 0,2 et 0,4. Les poissons et les céta-cés se trouvent souvent dans cette plage optimale ; leur propulsion est ainsi plus efficace que les hélices usuelles de bateaux.

Les alligators, en revanche, présentent des nombres de Strouhal supérieurs aux valeurs optimales. On comprend toutefois que l'efficacité et la performance de propulsion puissent être plus faibles chez une espèce amphibie que chez des espèces davantage aquatiques.

L'un de nous (G. Lauder) a employé les techniques de visualisation des écoulements pour révéler le motif des tourbillons de sillage associé aux changements d'allure des animaux nageurs, l'équivalent aquatique des changements d'allure observés chez les animaux terrestres.

Ainsi, l'étude de la nage du crapet arlequin (*Lepomis macrochirus*) montre que ce poisson utilise des combinaisons différentes de nageoires selon l'allure adoptée. À faible vitesse, il n'utilise que ses nageoires pectorales (situées près de la tête de part et d'autre du corps) ; à grande vitesse, il mobilise aussi ses nageoires caudale, anale et dorsale pour engendrer une poussée plus forte.

Le changement d'allure reflète des contraintes sur la poussée produite par les nageoires pectorales. Ces dernières émettent des paires d'anneaux tourbillonnaires associés à un jet central orienté latéralement. Cela favorise le contrôle et la stabilité de la nage aux petites vitesses. Plus la vitesse augmente, plus les jets latéraux s'écartent du corps, ce qui accroît la stabilité mais limite la poussée. La transition vers des ondulations du corps accompagnée



© J. Dabiri, J. Dabiri, J. Dabiri, J. Dabiri, J. Dabiri, J. Dabiri, J. Dabiri, J. Dabiri, J. Dabiri, J. Dabiri

LES ROBOTS NAGEURS IMITENT LES ANIMAUX NAGEURS en modifiant l'écoulement dans leur voisinage. Les grandes nageoires pectorales du *Mantabot* (a) engendrent un écoulement compliqué reproduit par une

simulation numérique (b). Des dispositifs automatiques d'immersion et de mesure sont employés pour étudier les écoulements créés par des organes natatoires pour robots biomimétiques (c, d).

d'un travail asynchrone des nageoires permet alors d'augmenter encore la quantité de mouvement transmise à l'eau propulsée vers l'aval.

Au contraire du crapet arlequin, les Embiotocidés, des poissons perciformes typiques de la côte Nord-Ouest de l'Amérique du Nord, sont capables d'utiliser leurs nageoires pectorales sur une large gamme de vitesses sans avoir recours à d'autres nageoires. Quand ces poissons accélèrent, le battement de leurs nageoires pectorales se réoriente vers l'arrière, ce qui y dirige les anneaux tourbillonnaires pectoraux et engendre une poussée.

Un rôle dans le brassage des eaux océaniques

Grâce aux techniques modernes de visualisation et à l'hydrodynamique numérique, les biologistes comprennent de mieux en mieux les écoulements autour des animaux nageurs. La façon dont ces derniers s'adaptent physiquement au milieu aquatique peut être analysée sous les angles fonctionnel, écologique et évolutionniste.

Ces progrès nourrissent aussi des questions plus globales : ainsi, J. Dabiri et Kakani Katija Young, de l'Institut océanographique de Woods Hole dans le Massachusetts, ont proposé que les écoulements créés par des myriades de nageurs jouent un rôle dans le brassage des eaux océaniques. Les mouvements incessants des animaux

seraient l'un des mécanismes de transport vertical de l'énergie au sein des océans, qui faciliterait en particulier le transport des nutriments. La nage des organismes marins serait donc à prendre en compte pour comprendre plus avant le changement climatique.

Nos recherches se poursuivent : actuellement, nous étudions la façon dont le crapet arlequin contrôle l'écoulement qui l'entoure à l'aide de nageoires oscillantes flexibles ; une technique que pratiquent aussi à leur manière les raies manta et pastenague. Nous voudrions en tirer une locomotion améliorée pour véhicules sous-marins autonomes, qui rende plus économes, plus manœuvrables et plus rapides ces robots très utilisés par les océanographes (voir la figure ci-dessus).

Comme les animaux aquatiques, les véhicules sous-marins autonomes doivent séjourner longtemps dans un milieu fluide 800 fois plus dense et 60 fois plus visqueux que l'air. Compte tenu de nos observations, nous avons toutes les raisons de croire que les véhicules sous-marins autonomes du futur seront équipés de nageoires oscillantes flexibles. L'ingénierie nous a fourni des techniques élaborées de visualisation des écoulements, qui nous permettent de dévoiler les astuces par lesquelles les animaux aquatiques tirent profit de leur environnement liquide. En retour, ces informations biologiques aident à mettre au point des robots nageurs plus perfectionnés. ■

BIBLIOGRAPHIE

L. Wen et al., *Biomimetic shark skin : Design, fabrication and hydrodynamic function*, *The Journal of Experimental Biology*, vol. 17, pp. 1656-1666, 2014.

N. Lanotte et S. Lem, *La physique de la natation*, *Pour la Science* n° 426, avril 2013.

J. Oeffner et G. V. Lauder, *The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications*, *Journal of Experimental Biology*, vol. 215, pp. 785-795, 2012.

C. Esposito et al., *A robotic fish caudal fin : Effects of stiffness and motor program on locomotor performance*, *Journal of Experimental Biology*, vol. 215, pp. 56-67, 2012.

G. V. Lauder et E. G. Drucker, *Forces, fishes, and fluids : Hydrodynamic mechanisms of aquatic locomotion*, *News in Physiological Sciences*, vol. 17, pp. 235-240, 2002.

Objets D'ici & D'ailleurs



Bijoux solaires



Météorites



Cadrams solaires



Montres solaires



 bijouxsolaires.com

La Clef des ETOILES

Boutique à Toulouse & sur internet
laclefdesetoiles.com

L'astronomie
pour tous



Comment trouver LA VIE SUR

L'ESSENTIEL

- Depuis le programme *Viking* des années 1970, aucune mission spatiale n'a consisté à rechercher spécifiquement de la vie sur Mars. Et ce programme n'a pas révélé de traces de vie concluantes.
- Des tests utilisés sur Terre pour identifier des biomolécules sont adaptables pour des missions martiennes.
- Ces tests pourraient être intégrés à des missions martiennes prévues dans quelques années.

NASA/JPL-CALTECH

Christopher McKay et Victor Parro García

L'eau a coulé sur Mars, mais cela a-t-il suffi pour que la vie s'y développe ? Une nouvelle génération d'instruments, capables de détecter les traces les plus infimes de vie, permettra bientôt de répondre à cette question.

Depuis que les premières sondes se sont posées sur Mars il y a près de quatre décennies, les astronomes ont beaucoup appris sur la planète rouge. Nous savons que de l'eau liquide a coulé autrefois à sa surface, et que la Terre et Mars se ressemblaient beaucoup dans leur jeunesse. Quand la vie est apparue sur Terre, il y a quelque 3,5 milliards d'années, Mars était plus chaude qu'aujourd'hui et

présentait des océans d'eau liquide, un champ magnétique actif et une atmosphère plus épaisse. Étant donné la ressemblance entre les deux planètes, les étapes qui ont conduit à la vie sur Terre se sont peut-être aussi déroulées sur Mars.

Des formes de vie microscopiques existaient peut-être même encore aujourd'hui sur la planète rouge. Cependant, toutes les missions d'exploration de notre voisine

LE CRATÈRE GALE

(au centre sur cette vue de Mars, reconnaissable à la montagne située à l'intérieur) a autrefois contenu de l'eau liquide. Au début de 2014, le rover *Curiosity* y a détecté des traces de molécules organiques.

MARS

depuis 35 ans ont porté sur sa géologie, et non sur sa biologie. Seules les sondes *Viking 1* et *2*, arrivées sur Mars en 1976, ont effectué la première (et à ce jour la seule) recherche de vie sur une autre planète.

Chacune de ces deux sondes a effectué quatre expériences, mais les chercheurs n'ont pas pu conclure sur la présence de vie martienne à partir des différents résultats, parfois contradictoires. Les missions *Viking* nous ont apporté plus d'énigmes que de réponses. Nous savons aujourd'hui que les méthodes expérimentales de *Viking* n'auraient pas trouvé la vie sur Mars même si les sondes l'avaient rencontrée. La question de la vie sur cette planète reste ouverte.

Dans les décennies suivantes, les microbiologistes ont développé une panoplie d'outils pour détecter des micro-organismes. Ces outils sont maintenant banals sur Terre. Mais si on les installait sur l'une des missions bientôt en partance vers Mars,

ils pourraient devenir déterminants : ils révéleraient enfin si cette planète a hébergé ou héberge encore de la vie.

Avant d'envisager le futur, revenons sur les missions *Viking* : pourquoi ont-elles donné des réponses ambiguës ? Les dispositifs mis en œuvre correspondaient aux techniques de l'époque. Dans l'expérience initiale, l'atterrisseur a recueilli une poignée de sol martien et y a ajouté des composés organiques pour nourrir les éventuels micro-organismes présents dans l'échantillon. Si des microbes étaient présents dans le sol, ils consommeraient la nourriture et libéreraient du dioxyde de carbone.

Et effectivement, les missions *Viking* ont détecté une telle émission. Ce test semblait donc indiquer que des micro-organismes étaient présents dans le sol martien. Mais à la lumière des autres expériences réalisées par les missions *Viking*, un doute subsistait.

La deuxième expérience recherchait des signes de photosynthèse, mais elle n'a pas livré de résultats clairs. Une troisième expérience consistait à ajouter de l'eau dans un échantillon de sol.

Si la vie était présente, le sol humide aurait pu produire du dioxyde de carbone. Au lieu de cela, il a produit de l'oxygène. C'était très étrange, parce que sur Terre, aucun sol ne se comporte ainsi. Les scientifiques en ont conclu que cet oxygène provenait d'une réaction chimique qui restait à identifier.

Dans la dernière expérience, les sondes ont recherché dans le sol des substances organiques, des composés contenant du carbone qui constituent les briques de la vie telle que nous la connaissons sur Terre. Si la vie existe sur Mars, ces composés devraient s'y trouver. Cependant, la présence de composés organiques ne constitue pas à elle seule une preuve absolue de vie. Les météorites contiennent des composés organiques qui ne sont pas d'origine biologique et qu'ils déposent sur la planète quand ils s'écrasent à sa surface. Pourtant, pas la moindre trace de substances organiques n'a été trouvée.

Réunies, ces données ont laissé les chercheurs perplexes. La plupart des scientifiques pensaient que les résultats des deux dernières expériences étaient due à des réactions chimiques. De telles réactions avaient pu détruire les composés organiques. En revanche, la chimie ne pouvait pas expliquer la libération de dioxyde de carbone. Quelques spécialistes de Mars ont alors affirmé que la première expérience avait en fait trouvé des traces de vie. Mais tous les autres en ont conclu que Mars était stérile.

En 2008, 32 ans après *Viking*, la solution à ces énigmes a commencé à émerger quand l'atterrisseur *Phoenix* de la Nasa s'est posé dans la région du pôle Nord de Mars. À la surprise générale, *Phoenix* a détecté du perchlorate, une molécule rare sur Terre qui comporte quatre atomes d'oxygène liés à un ion chlore, le tout relié à un ion magnésium ou calcium. Quand les sels de perchlorate atteignent 350 °C, ils se

décomposent en libérant de l'oxygène et du chlore. Les perchlorates sont tellement réactifs qu'ils sont utilisés par l'industrie dans de nombreux propergols (produits

Les deux sondes *Viking* ont plus posé d'énigmes qu'apporté de réponses.

de propulsion de fusées).

Avec cette découverte, de nombreux chercheurs ont compris que les expériences des sondes *Viking* ne pouvaient pas détecter les traces de vie sur Mars. L'expérience de recherche organique de *Viking* commençait en effet par chauffer l'échantillon de sol à 500 °C, de façon à vaporiser les

de nourriture au sol s'était accompagnée d'une émission de dioxyde de carbone. Or le perchlorate produit des composés apparentés à l'eau de Javel quand il est exposé à des rayons cosmiques. Ces substances décomposent les molécules organiques (telles celles apportées par les sondes) et produisent du dioxyde de carbone.

Dans la troisième expérience, de l'oxygène a émergé du sol humide. La réaction de production de l'eau de Javel forme aussi de l'oxygène, mais cet oxygène reste piégé dans le sol. Il n'est libéré que plus tard, quand le sol est mouillé, comme cela était le cas dans une des expériences de *Viking*. Deux énigmes résolues.

Ainsi, les méthodes utilisées n'étaient pas adaptées aux conditions martiennes.



AUTREFOIS LAC D'EAU DOUCE, LE CRATÈRE GALE a peut-être abrité la vie. Le successeur du rover *Curiosity* sera capable d'effectuer des expériences qui détermineront s'il y subsiste des traces de vie.

éventuelles molécules organiques et à les détecter sous forme gazeuse. Ce chauffage aurait décomposé les sels de perchlorate. Les réactifs auraient alors détruit et effacé toute trace de vie dans le four de la sonde. En 2010, l'équipe dirigée par Rafael Navarro-González, de l'Université nationale autonome du Mexique, et dont l'un de nous (Ch. McKay) faisait partie a testé ce scénario et a conclu que le perchlorate avait détruit tout composé carboné du sol dans le processus de chauffage.

Le perchlorate dissipe également le mystère de la première et de la troisième expérience. Dans la première, l'apport

Pour autant, tout espoir n'est pas perdu de découvrir de la vie. Depuis qu'il s'est posé en mars 2012, le rover *Curiosity* prélève des échantillons de sol martien. En début d'année, l'équipe de l'instrument SAM (*Sample Analysis at Mars*, Analyse d'échantillons sur Mars), dirigée par Paul Mahaffy du Centre de vol spatial Goddard de la Nasa et dont fait partie Ch. McKay, a rapporté que l'expérience a trouvé des composés carbonés dans d'anciens sédiments au fond du cratère Gale, même en présence de perchlorate. Il existe donc bien des substances organiques sur Mars – *Viking* n'a simplement pas su les trouver.

Pourrait-il en être de même pour la vie ? Depuis la construction des atterrisseurs *Viking*, les techniques utilisées en microbiologie ont connu des avancées spectaculaires. Les missions *Viking* utilisaient des méthodes reposant sur la culture de micro-organismes dans des boîtes de Petri. Mais ces techniques ne sont plus considérées comme pertinentes, et nous savons maintenant que seule une petite fraction des micro-organismes du sol peut être mise en culture.

Approches modernes

Les scientifiques ont développé des approches beaucoup plus sensibles qui détectent directement les biomolécules des formes de vie microbiennes. Ces nou-

LES AUTEURS



Christopher McKay est chercheur au Centre de recherche Ames de la Nasa, en Californie.



Victor PARRO GARCIA est chercheur au Centre espagnol d'astrobiologie, à Madrid.

la Terre, il se peut que cela ne soit pas le cas avec la vie extraterrestre. Ou s'il est présent, il pourrait être tellement différent que les détecteurs conçus sur la base de la biologie terrestre ne le déceleraient pas.

Il est néanmoins possible de détecter la vie sous d'autres formes qui pourraient être présentes sur Mars. Parmi ces marqueurs biologiques, notons en particulier les protéines et les polysaccharides. Les protéines sont de longues chaînes linéaires composées d'acides aminés, dont il existe dans le monde vivant 20 types. Des acides aminés sont présents dans les météorites, et il est vraisemblable qu'ils aient été un élément commun à l'environnement prébiotique de toutes les planètes. Les polysaccharides sont de longues chaînes de sucres construites par des enzymes (des



NASA/JPL-CALTECH/MARS SPACE SCIENCE SYSTEMS

velles méthodes seraient plus efficaces pour rechercher la vie sur Mars.

La méthode la plus connue repose sur la détection et le séquençage de l'ADN. Il n'est plus nécessaire de mettre un organisme en culture afin qu'il se réplique suffisamment et fournisse assez d'ADN pour effectuer le séquençage. Plusieurs équipes travaillent à l'intégration des techniques d'extraction de l'ADN dans des instruments adaptés aux prochaines missions martiennes.

L'un des inconvénients de la détection de l'ADN pour mettre en évidence la vie sur Mars est que même si l'ADN est présent chez tous les organismes vivants de

catalyseurs biologiques), qui sont elles-mêmes des protéines.

La détection de molécules aussi complexes qu'une protéine ou un polysaccharide serait très convaincante comme trace de vie au sens large (définie comme un système biologique qui encode de l'information et utilise cette information pour construire des molécules complexes). Ces molécules complexes se démarqueraient facilement au milieu de simples molécules prébiotiques.

L'un d'entre nous (V. Parro García) développe un instrument visant à détecter ces molécules complexes sur Mars. Cet instrument repose sur une technique de

dosage immunologique déjà utilisée pour détecter en même temps des centaines de protéines différentes, polysaccharides et autres biomolécules (dont l'ADN).

Les tests de dosage immunologique utilisent des anticorps (des protéines en forme de Y) qui se lient à des biomolécules (voir l'encadré ci-dessous). On verse une solution de l'échantillon à tester sur un large assortiment d'anticorps, conçus chacun pour se lier à une cible spécifique. Si la solution contient une molécule qui se lie à un anticorps du réseau, l'anticorps la capture et, en s'y liant, l'identifie.

L'un des grands atouts des dosages immunologiques est que les anticorps peuvent détecter des molécules plus petites et moins complexes que des protéines entières. Ces tests recherchent des molécules en rapport avec la vie, mais de moindre complexité, telles que des fragments de protéines cassées. Trouver ces morceaux serait suffisant pour conclure que la vie existe sur Mars.

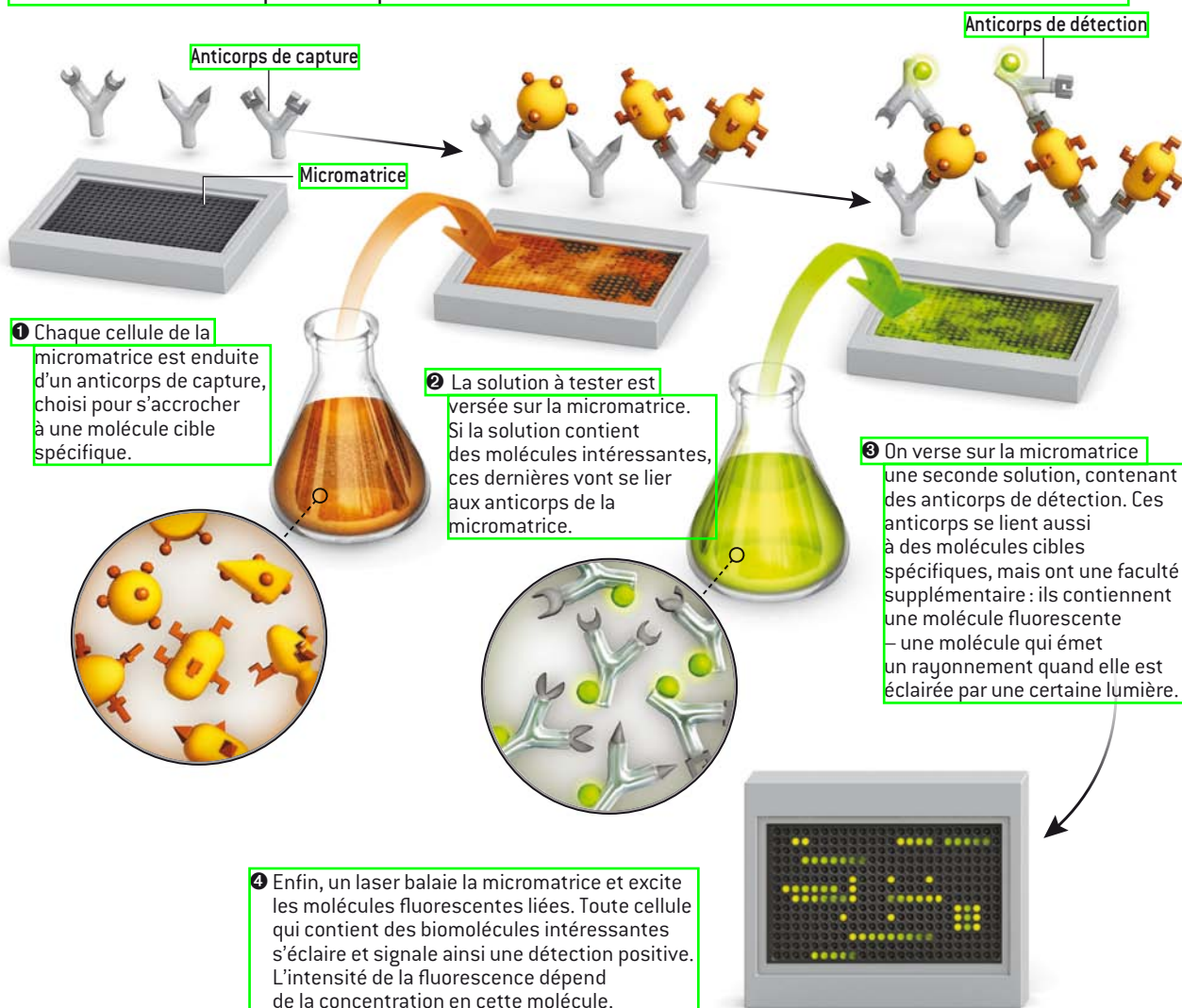
On estime que l'ensemble des organismes terrestres totalise environ dix millions de protéines différentes. Avec un tel choix, comment sélectionner les quelques centaines que l'on pourrait rechercher avec

un seul test de dosage immunologique ? La réponse courte est que nous ne savons pas vraiment. Mais nous pouvons faire quelques hypothèses.

Tout d'abord, nous pourrions rechercher des protéines utiles ou essentielles à la vie sur Mars. Par exemple, des enzymes qui consomment du perchlorate, des enzymes adaptées au froid qui permettraient à un micro-organisme de survivre aux températures glaciales de Mars, ou des enzymes qui réparent les dégâts causés sur l'ADN par le rayonnement ionisant, intense sur Mars. Et, par ailleurs, nous pourrions

LE DÉTECTEUR DE PROTÉINES MARTIENNES

Les tests de dosage immunologique utilisent la propriété de « Velcro » des anticorps (des protéines en Y du système immunitaire) pour piéger des molécules de façon spécifique. Un unique test de dosage immunologique peut identifier des centaines de molécules biologiques (telles que les protéines), de même que des fragments de molécules. Ces tests sont en cours d'optimisation pour la détection de traces de vie sur Mars.



cibler des molécules omniprésentes dans le monde microbien, tel le peptidoglycane, un composant universel de toutes les parois bactériennes, ou l'adénosine triphosphate (ATP), qui fournit à toutes les formes de vie sur Terre l'énergie chimique nécessaire au métabolisme.

Même si l'environnement hostile de Mars a détruit les grosses molécules telles que l'ADN et les protéines, il serait néanmoins possible de trouver des traces de vie dans les débris. Par exemple en étudiant leurs conformations. De nombreuses molécules sont chimiquement équivalentes, mais présentent une « chiralité » opposée (leurs liaisons peuvent être orientées vers la droite ou vers la gauche). La vie sur Terre est dominée par les acides aminés lévogyres (ils font tourner le plan de polarisation de la lumière vers la gauche). Si une expérience trouve un ensemble particulier d'acides aminés de chiralité dominante droite ou gauche, cela serait une preuve convaincante de la présence de vie sur Mars. En outre, si nous découvrons que les formes de vie sur Mars présentent surtout des acides aminés dextrogyres (de chiralité opposée aux lévogyres), cela indiquerait que la vie sur les deux planètes s'est développée de façon indépendante.

Les missions de demain

Un appareil qui rechercherait la vie sur Mars serait équipé de plusieurs instruments : un détecteur d'ADN, une micromatrice pour dosage immunologique et un dispositif de détection et caractérisation des acides aminés, par exemple. La technologie est presque prête.

La tâche suivante est de sélectionner un site martien où d'éventuelles traces biologiques seraient préservées. La glace et le sel sont propices, car ils protègent les marqueurs biologiques des dégradations et de la désintégration. Les basses températures de Mars font que les altérations thermiques sont négligeables, même à une échelle de temps comparable à l'âge de la planète. En revanche, le rayonnement ionisant pourrait détruire, en quelques milliards d'années, les marqueurs biologiques se trouvant à moins d'un mètre de la surface.

Les cibles prometteuses sont donc les zones glacées qui ont pu abriter récemment la vie, tel le site d'atterrissage de *Phoenix* près du pôle Nord de Mars, ou des sites où l'érosion a récemment mis à nu le matériau



LE ROVER CURIOSITY a été conçu pour étudier la géologie et le climat martien. Il a effectué des forages, ce que fera aussi son successeur, mais pour chercher des traces de vie.

NASA/JPL/Caltech / MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS

BIBLIOGRAPHIE

A. McEwen, Une planète façonnée par l'eau, *Dossier Pour la Science*, n° 84, juillet-septembre 2014.

C. McKay et al., The Icebreaker life mission to Mars: a search for biomolecular evidence for life, *Astrobiology*, vol. 13, n° 4, pp. 334-353, 2013.

P. Smith, On a creusé sur Mars, *Pour la Science*, n° 411, janvier 2012.

J. Bell, Mars : un passé humide, *Pour la Science*, n° 352, février 2007.

ancien. Dans un cas comme dans l'autre, il faudra creuser pour extraire des échantillons à plus d'un mètre sous la surface.

Les futures missions martiennes seront équipées pour rechercher de telles traces de vie. La mission européenne *ExoMars*, prévue pour 2018, emportera une foreuse. Et le projet *Mars 2020* de la Nasa prévoit un rover similaire à *Curiosity* (voir la figure ci-dessus), mais équipé d'autres instruments. Ces missions consisteront à explorer les régions équatoriales sèches de Mars à la recherche de marqueurs biologiques dans les sels et les dépôts de sédiments (voir l'article de Sylvestre Maurice et Michel Viso page 60).

Quant aux pôles, aucun rover ne peut s'y aventurer, mais la Nasa étudie la possibilité d'envoyer un atterrisseur bon marché nommé *Icebreaker*. Équipé d'une foreuse d'un mètre et d'un instrument de dosage immunologique, il pourrait sonder le sol gelé boréal, riche en eau, de Mars.

Les dernières décennies de recherche n'ont laissé aucun doute : de l'eau liquide a autrefois coulé sur Mars. Il est maintenant temps de voir si cette planète a abrité des organismes vivants et si l'Univers offre aussi bien une diversité de corps célestes que de formes de vie. ■

CAP SUR MARS

avec *ExoMars* et *Mars2020*

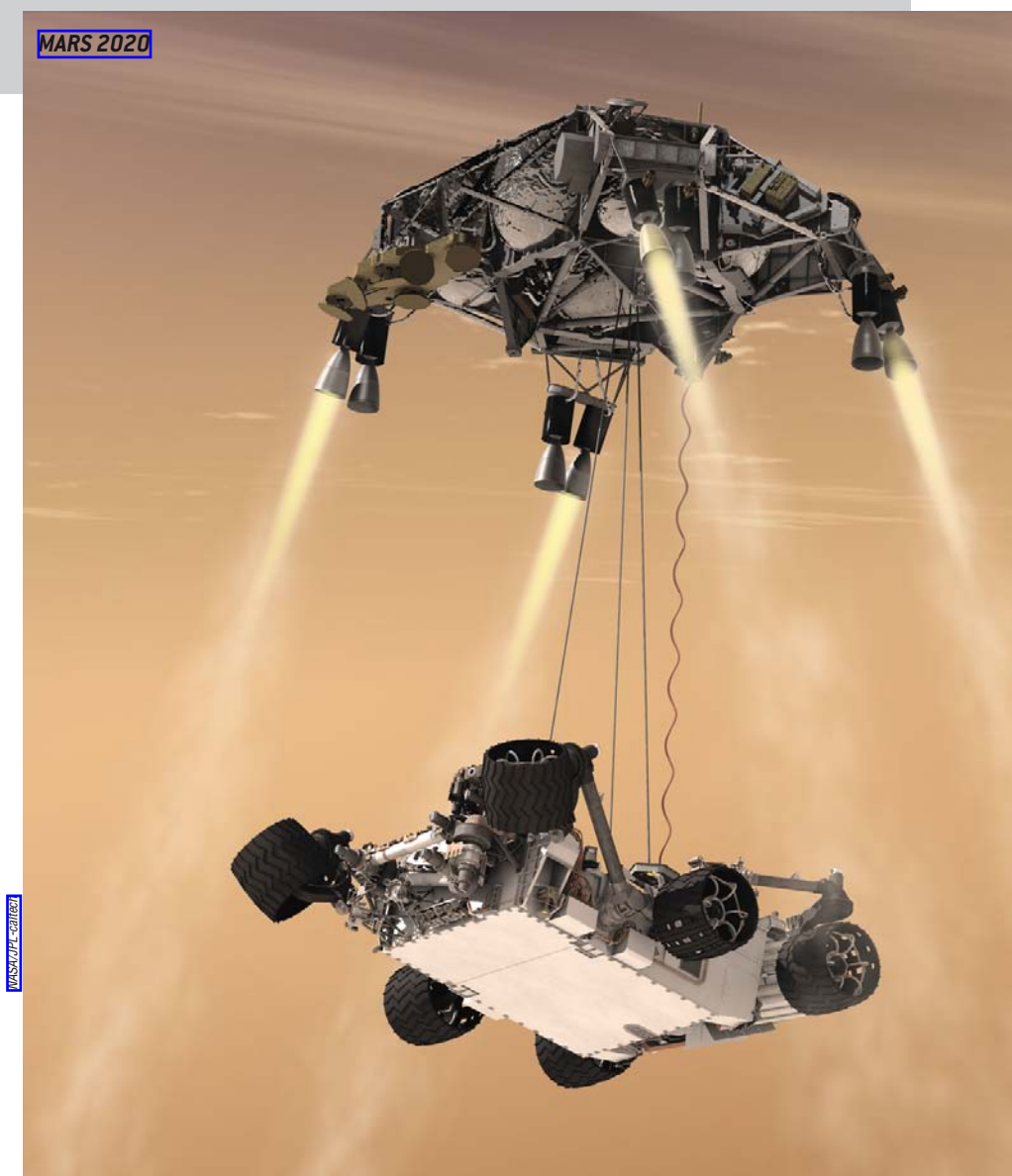
Sylvestre Maurice et Michel Viso

Les missions martiennes les plus récentes ont montré que Mars a été une planète habitable. Prochain objectif : la recherche de traces d'une vie passée ou encore présente.

Au cours des dernières années, *Spirit*, *Opportunity* et *Curiosity*, des véhicules télécommandés – ou rovers – ont sillonné la surface de Mars. Leurs instruments ont montré que de l'eau liquide avait coulé sur Mars. Cette eau était riche en éléments nécessaires pour la chimie organique. Les chercheurs ont conclu que dans le passé, il y a plus de trois milliards d'années, certaines régions de Mars ont été – par moments – habitables. Pour autant, la vie s'y est-elle développée ? Les exobiologistes préparent de nouvelles missions pour rechercher des traces éventuelles d'une vie passée ou actuelle sur Mars.

Quelles sont les stratégies adoptées par les agences spatiales et sous quelles formes les exobiologistes cherchent-ils les traces de vie ? Les signes directs (molécules chimiques complexes, acides nucléiques) sont les plus univoques (voir l'article de Ch. McKay et V. Parro García, page 54), mais ces marqueurs sont difficiles à découvrir, sauf si la vie est encore présente et abondante. Les signes indirects sont des modifications de l'environnement par d'éventuels micro-organismes martiens. Ces signes seraient conservés par les roches pendant des millions, voire des milliards, d'années. Les régions de Mars les plus propices à héberger des traces d'une vie éventuelle sont celles où, par exemple, de l'eau a longtemps stagné.

MARS 2020

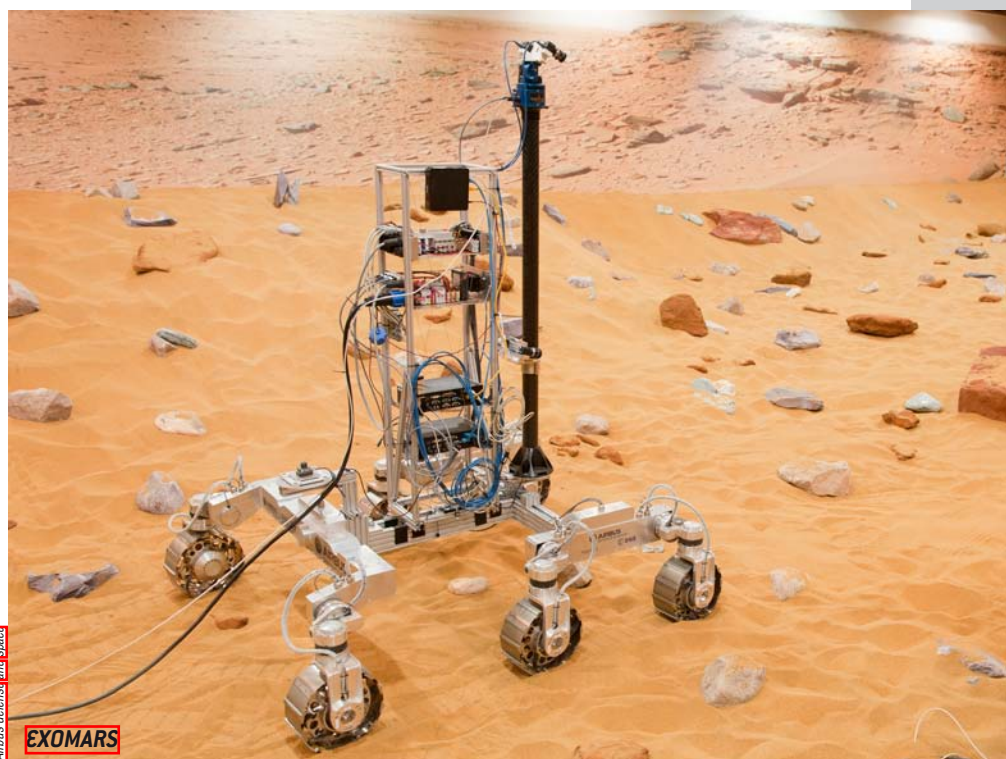


L'Agence spatiale européenne et les équipes scientifiques étudient ainsi, à partir des données des sondes en orbite *Mars Express* et *MRO*, quatre sites d'atterrissage potentiels pour le rover de la mission *ExoMars 2018*. Ce programme mené en coopération avec la Russie est constitué de deux phases. La première partie, *ExoMars 2016*, comprend un satellite équipé de spectromètres pour étudier les gaz de l'atmosphère. Le satellite servira aussi de relais de télécommunication entre la Terre et les véhicules opérant sur la surface martienne. La mission emportera aussi la plateforme *Schiaparelli* qui servira de dispositif d'atterrissage test pour éprouver la technique qui sera employée lors de l'atterrissage du rover de la mission *ExoMars 2018*.

Le véhicule européen (à droite, la motorisation des roues est testée sur un sol analogue à certaines régions martiennes) transportera huit instruments européens et un instrument russe qui chercheront et analyseront des échantillons susceptibles de contenir des traces d'une activité chimique prébiotique passée ou d'une vie éventuelle. Les images du panorama en haute définition de la caméra *PanCam* et une analyse de la minéralogie par le spectromètre infrarouge russe *ISEM* serviront à déterminer les endroits les plus prometteurs à explorer.

Durant les déplacements du véhicule, le détecteur *ADRON* enregistrera le flux de neutrons qui signe la présence d'hydrogène, donc éventuellement d'eau, jusqu'à une profondeur de un mètre. Un radar de sondage *WISDOM* explorera les premiers mètres du sous-sol et une foreuse prélèvera des échantillons jusqu'à deux mètres de profondeur. La colonne de forage sera analysée par le spectromètre infrarouge *MaMiss*. Le microscope *CLUPI* examinera la poussière de forage et les échantillons prélevés.

Ces derniers seront déposés dans une broyeuse et la poudre sera analysée par le spectromètre imageur *MicrOmega* et le spectromètre Raman *RLS* qui identifieront les minéraux et détecteront les traces de matière organique. Si l'échantillon est intéressant, il sera alors analysé par le système *MOMA* combinant la chromatographie gazeuse, pour séparer et concentrer les molécules organiques, et un spectromètre de masse, pour les identifier. Cet instrument, fruit d'une coopération entre l'Europe et les États-Unis, est considéré comme le premier système susceptible de mettre en évidence les molécules organiques complexes et de



masse importante qui pourraient être la signature d'une vie passée ou actuelle.

La Nasa, avec *Mars2020*, opte pour un dispositif maintenant éprouvé. Le véhicule sera presque identique à *Curiosity* (à gauche, vue d'artiste de l'atterrissage du rover) à l'exception des roues. Celles de *Curiosity*, en aluminium, ont été endommagées par des

Radars, spectromètres, chromatographes, etc. : les rovers martiens embarqueront de nombreux instruments d'analyse.

rochers martiens plus vulnérants que prévu.

À bord de *Mars2020*, les instruments observeront (caméra *MastCamZ*) et analyseront les roches dans l'environnement du véhicule à différentes longueurs d'onde (*SuperCam*, *Sherloc*, *PIXL*). Le radar *RAMFIX* explorera les premiers mètres du sous-sol pendant les déplacements du véhicule. Ces instruments sont nouveaux ou plus performants que ceux de *Curiosity*. Ils fourniront des données chimiques, minéralogiques et environnementales nécessaires pour préciser les conditions d'habitabilité et détecter la présence éventuelle de composés organiques. Par ailleurs, les prélèvements intéressants de roche seront placés dans

des tubes étanches, eux-mêmes enfermés dans un conteneur qui pourra être récupéré lors d'une mission ultérieure et rapporté sur Terre. En matière d'analyse, rien ne vaut la variété et les performances des instruments des laboratoires... terrestres!

Cette mission prépare aussi l'avenir de l'exploration martienne. *Mars2020* embarque l'expérience *MOXIE* qui testera une technique d'extraction du dioxygène à partir du gaz carbonique martien, en vue de futures missions habitées.

Dans les prochaines années, il faudra interpréter les données des missions martiennes à venir qui incluent d'autres projets américains (*Maven*, *Insight*) ainsi que des missions indiennes ou chinoises. Elles produiront des données complémentaires qu'il faudra replacer dans leur contexte environnemental et géologique. Cette tâche est délicate, mais les exobiologistes espèrent que *ExoMars* et *Mars2020* apporteront, à elles deux, des éléments essentiels pour répondre à la question de l'émergence éventuelle d'une vie sur Mars. ■

Sylvestre MAURICE est astrophysicien et planétologue à l'IRAP (CNRS/Université Paul Sabatier, Toulouse).

Michel VISO est responsable de la thématique exobiologie au Centre national d'études spatiales (Cnes), à Paris.

Stephen Hawking

le mythe du génie solitaire

Hélène Mialet

Chercheur brillant mais lourdement paralysé, le théoricien britannique est, contrairement à l'image qu'on se plaît à donner de lui, l'antithèse du savant solitaire armé de la seule puissance de son cerveau.

Stephen Hawking est l'un des rares scientifiques actuels ayant acquis une renommée internationale au sein du grand public. Célèbre pour ses travaux sur les singularités dans l'espace-temps et les trous noirs, cet astrophysicien théoricien britannique, aujourd'hui âgé de 73 ans, a aussi marqué les esprits par sa condition physique. Lourdement paralysé par la maladie de Charcot (sclérose latérale amyotrophique) qui l'a atteint dès les années 1960, Hawking ne peut ni bouger ni parler ; il communique grâce à un dispositif lui permettant de sélectionner des mots sur un écran par une légère contraction de la joue et un rayon infrarouge attaché à ses lunettes, mots prononcés ensuite par un synthétiseur vocal. Et pourtant, il poursuit son activité scientifique.

Ces deux aspects de sa personne, son talent scientifique et son lourd handicap physique, ont en partie contribué à faire de Hawking une icône. Une icône encore renforcée par le film *Une merveilleuse histoire du temps*, de James Marsh, qui sort ces jours-ci sur les écrans (voir l'illustration page 66).

Le 8 janvier 2013, le jour de l'anniversaire de Hawking, j'ai publié un article dans le magazine en ligne *Wired* afin de parler de

cet astrophysicien d'une façon nouvelle, en soulignant le rôle crucial joué par son entourage humain et matériel. L'article plut dans un premier temps, mais cela ne dura pas longtemps. Le tabloïd anglais *Daily Mail* s'en empara, l'interpréta de travers et me transforma en un monstre attaquant un héros national, qui plus est un homme profondément handicapé. L'article du *Daily Mail* devint viral. Je fus extrêmement choquée par la réaction que suscita mon texte, par la malhonnêteté des journalistes, mais aussi par ce qu'Internet, de par son anonymat, permet : j'ai reçu des courriels d'une violence et d'une cruauté inouïes.

J'avais touché, semble-t-il, une corde sensible. J'avais touché à un mythe de notre modernité, si bien incarné par Hawking : l'idée qu'un homme seul, aujourd'hui incapable de bouger et de parler, puisse atteindre les lois ultimes de l'Univers grâce à la seule force de son entendement. La science est souvent représentée comme étant le produit d'un puissant cerveau ou d'un pur et bel esprit ; or en montrant que, contrairement à l'idée reçue, Hawking n'est pas un pur cerveau, mais qu'il dépend d'un réseau complexe composé de machines et d'humains lui permettant de penser, j'avais

L'ESSENTIEL

■ Stephen Hawking est un brillant théoricien en astrophysique et en cosmologie.

■ Il souffre depuis les années 1960 d'une maladie qui le prive de ses mouvements et de la parole.

■ Il communique avec son entourage grâce à des machines, et ne peut poursuivre ses recherches qu'avec l'aide de ses étudiants et collègues.

■ Cette dépendance souligne le caractère collectif de l'activité de Hawking et, par extension, celle de tout scientifique.

© MICHAEL FORT / ISTOCKPHOTO

non seulement déstabilisé l'image du héros scientifique, mais également l'image de la façon dont la science fonctionne.

Je fais partie de ce courant de sociologues, d'anthropologues et d'historiens des sciences qui se focalisent non pas sur la science établie, mais sur la science en train de se faire, en suivant les nombreuses controverses qui secouent aujourd'hui notre planète ou en ouvrant la porte des laboratoires pour comprendre ce qui s'y produit et comment.

Ce courant de la sociologie des sciences né dans les années 1960-1970 est nommé *science and technology studies* ; on l'a souvent interprété comme étant une attaque contre la science, alors que ce n'est pas le cas, du moins dans le cadre de la tradition

de pensée à laquelle j'appartiens. L'idée est plutôt de redonner chair et consistance au monde éthéré de la science, tel qu'il a souvent été représenté, et de montrer les complexes ramifications sociales et matérielles qui lui permettent d'exister. La science en train de se faire est fascinante, elle n'est en rien froide et détachée du monde social, elle est profondément entremêlée dans de nombreuses pratiques et participe à notre fabrique sociale.

C'est dans ce contexte que je me suis demandé pourquoi le mythe du génie solitaire capable de produire de la théorie en s'appuyant sur les seules forces de sa raison est toujours aussi puissant. La sociologie des sciences nous a appris que la science est le produit du langage, formel

ou informel, oral ou écrit ; que se passe-t-il dans le cas d'un homme incapable de parler ? Elle nous a appris que la science est le produit des gestes, de la manipulation des instruments, du savoir tacite, des *habitus* (manières d'être) des individus ; qu'en est-il dans le cas d'un homme qui a perdu l'usage de ses mains ? Elle nous a appris que la science est le produit d'un collectif ; qu'en est-il dans le cas de Hawking, qui semble incarner le génie solitaire ?

Pour répondre à ces questions, Hawking et son monde sont devenus ma tribu pendant près de dix ans. J'ai observé et interrogé Hawking lui-même ainsi que ses assistants, ses infirmières, ses étudiants, d'autres physiciens avec qui il travaille, mais aussi les ingénieurs qui ont construit



STEPHEN HAWKING EN QUELQUES DATES

1942 Naissance le 8 janvier à Oxford, en Angleterre.

1959-1962 Études à l'Université d'Oxford, puis début de la thèse de doctorat à l'Université de Cambridge.

1963 Premiers signes de sclérose latérale amyotrophique.

1965 Obtention du doctorat, sur l'étude des singularités.

1970 Avec Roger Penrose, il montre sous certaines conditions que l'Univers a débuté par une singularité.

1974 Travaux montrant que les trous noirs « s'évaporent » (rayonnement de Hawking).

1979-2009 Chaire de professeur lucasien à l'Université de Cambridge.

1981 Selon lui, l'information est définitivement perdue dans un trou noir.

1988 *A Brief History of Time* (*Une brève histoire du temps*), succès de librairie.

2004 Nouvelles idées, selon lesquelles l'information n'est pas détruite dans un trou noir.

les logiciels qu'il utilise pour communiquer, les journalistes qui ont écrit à son propos, les artistes qui l'ont représenté.

Mes questions étaient les suivantes. Comment est-il possible à Hawking de voyager et de donner des conférences de par le monde entier lorsqu'il lui est impossible de bouger ? Comment lui est-il possible d'écrire des articles scientifiques alors qu'il ne peut pas courir à la bibliothèque chercher un livre, discuter longuement dans les couloirs de son bureau ou de la cafétéria ou feuilleter rapidement une revue ? Comment lui est-il possible de résoudre des équations alors qu'il ne peut utiliser un crayon et du papier, faire des ratures ou prendre une craie et gribouiller ses idées au tableau ? Comment lui est-il possible de donner un entretien lorsque répondre à la moindre question prend des heures ? Comment lui est-il possible de séduire une assemblée quand il ne peut pas jouer de sa voix et de ses gestes pour la convaincre ?

Est-ce que l'action d'un homme aux multiples facettes (théoricien, conférencier, auteur, acteur, etc.) peut se réduire au fonctionnement de son cerveau ? C'est ainsi que la presse le représente et c'est ainsi que Hawking parle de lui : il aime répéter qu'un astrophysicien n'a besoin de rien d'autre que son esprit pour produire des théories. C'est aussi la façon dont le nouveau film de J. Marsh le représente. J'ai donc essayé de comprendre ce que Hawking faisait, comment il communiquait et comment on communiquait avec lui, quels genres d'informations passaient par son ordinateur, qu'est-ce qui était négocié dans le face à face. J'ai essayé de décrire ce qu'il faisait et quels genres de compétence on lui attribuait.

« Hawking, c'est sa tête ». Voilà ce qu'on apprend quand on parcourt les couloirs du Département de mathématiques appliquées et de physique théorique à l'Université de Cambridge, et que l'on interroge ceux qui travaillent avec lui – ses collègues et ses étudiants. « Puisqu'il ne peut pas faire des calculs, il doit penser. C'est logique ! », me dit l'un d'eux. En effet, au dire de tous, ce qui le caractérise, c'est son intuition, c'est-à-dire sa capacité à repérer les problèmes intéressants et à entrevoir la solution. Il a, semble-t-il, la faculté d'aller droit au but sans faire de calculs, de prendre des raccourcis.

Si les compétences intellectuelles attribuées au scientifique semblent parfaitement adaptées au domaine de la physique qu'il

pratique, le physicien théoricien américain Kip Thorne, comme tant d'autres, voit également un lien direct entre la progression de la maladie de Hawking et sa façon de penser. Inévitablement, en le privant de l'usage de ses mains, elle a limité l'exercice de manipulation gestuelle qu'impose tout travail calculatoire, mettant en relief, par son absence, le rôle fondamental d'un corps mobile dans un travail mathématique de type analytique : « Parce que c'est impossible de faire de longs et complexes calculs sans écrire des équations. De façon étonnante, il se débrouille assez bien avec les équations, mais il ne peut pas le faire aussi bien que la plupart des autres physiciens qui se trouvent à la pointe dans le même domaine. »

Un handicap transformé en avantage ?

De fait, Hawking aurait, dit-on et dit-il, transformé son handicap en avantage et développé une façon de court-circuiter ces limites, en redéfinissant les questions de façon à ce qu'il puisse visualiser, soit la solution (c'est-à-dire voir à quoi cette dernière ressemblerait physiquement), soit le cadre dans lequel le problème se pose afin de le résoudre en manipulant mentalement des images (des formes, des structures géométriques, des modèles élaborés) plutôt que des équations. Il serait ainsi devenu particulièrement bon dans les problèmes qu'il peut retraduire géométriquement, et moins bon dans ceux qui résistent à ce genre de transformation.

Hawking semble confirmer cette intuition et justifier sa façon de penser – et de faire de la physique – non pas en affirmant, comme il l'a fait auparavant, que le corps n'aurait pas à jouer un rôle nécessaire dans le cadre d'un travail théorique, mais en évacuant ce sur quoi semblait reposer la spécificité de la méthode et de la rationalité scientifiques : le langage mathématique. Nul n'a besoin d'équations pour faire de la physique, écrit-il, les idées fondamentales peuvent être expliquées en mots et en images.

Pourtant, ce qui semble être le produit d'une visualisation purement introspective et mentale – manipuler des images dans sa tête – repose en partie, pour Hawking, sur la capacité ou l'acte physique de voir avec ses yeux des diagrammes : des représentations en deux dimensions, c'est-à-dire des dispositifs matériels, concrets et



STEPHEN HAWKING EST ASSISTÉ de machines et de personnes qui lui permettent non seulement de communiquer, mais aussi de réfléchir et raisonner sur les problèmes posés dans son domaine scientifique. Son environnement technique et humain joue ainsi un rôle tant matériel qu'intellectuel.

« visualisables ». Comme le note Christophe Galfard, l'un des (ex) étudiants de Hawking: « S'il n'y avait pas eu les découvertes de diagrammes, que ce soit par Roger Penrose ou Richard Feynman, ça aurait rendu la vie de Stephen beaucoup plus difficile. »

Les diagrammes offriraient donc, pour lui, des possibilités, voire une ouverture, qu'une formule mathématique obstruerait, à l'inverse. Mais, à nouveau, comment Hawking procède-t-il ? À la différence de ses collègues, il ne peut écrire les équations à la main, ni dessiner les diagrammes lui-même. Le rôle de ses étudiants est donc fondamental.

Hawking est en général entouré de quatre étudiants qu'il voit régulièrement. Ils sont respectivement en première, deuxième, troisième et quatrième année de thèse de doctorat. La durée d'une thèse est de quatre ans. À chaque fois qu'un étudiant quitte le cercle, un autre le remplace. Loin d'être les simples mains, jambes, bras de Hawking (en quelque sorte le simple corps exécutif de son esprit), ces jeunes étudiants brillent par leur excellence. Ils sont recrutés à l'Université de Cambridge par un examen réputé (*Certificate of Advanced Study in Mathematics (Part III)*), qui attire chaque année des centaines d'étudiants du monde entier. Cent étudiants sont retenus. À la fin des neuf mois

L'AUTEUR



Hélène MIALET est philosophe, sociologue et anthropologue des sciences. Elle enseigne à l'Université de Californie à Davis et à Berkeley, aux États-Unis. Ses travaux portent sur l'invention scientifique, la subjectivité, la cognition distribuée, la relation hommes-machines.

préparatoires, les quatre meilleurs sortants auront le privilège d'être auditionnés par Hawking, qui en choisira un seul.

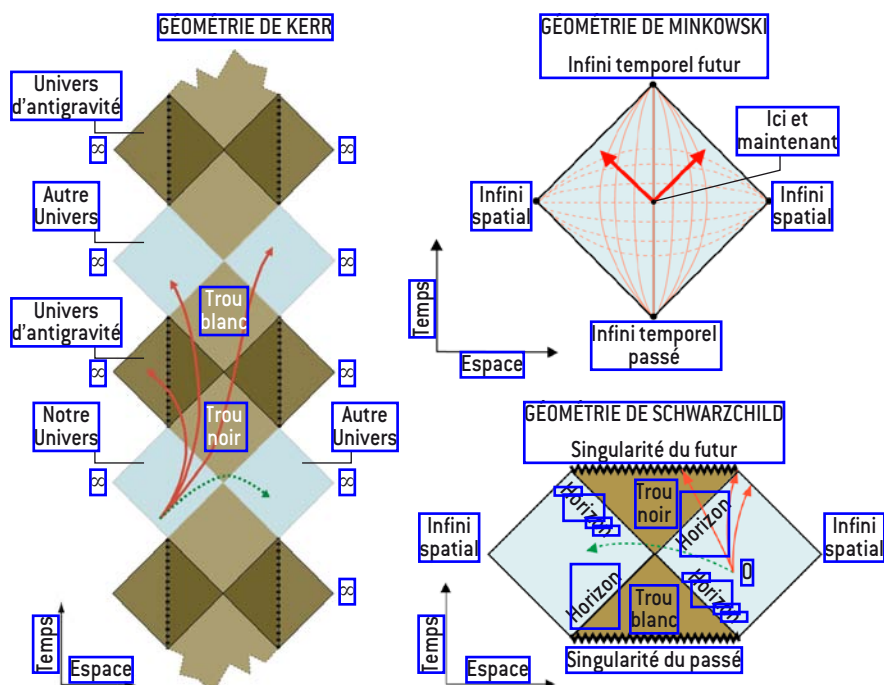
Hawking assigne à ses étudiants, en fonction de leurs compétences et de leurs intérêts mutuels (grâce à l'examen, il connaît leurs points forts et leurs faiblesses), des sujets différents, de telle sorte qu'il y ait un minimum de recouvrement entre eux. Cela explique peut-être sa capacité à multiplier ses champs d'intervention, à « avoir une vue d'ensemble », comme disent de lui ses étudiants. En général, l'étudiant recruté poursuit le sujet de recherche de celui qui le précède. Lorsque je les ai rencontrés pour la première fois, le premier étudiant les trous noirs virtuels (trous noirs éphémères formés par les fluctuations quantiques de l'espace-temps) et leur influence sur la prédictibilité, le second la cosmologie quantique et la propagation des trous noirs, le troisième la formulation mathématique de la relativité générale, et le quatrième la stabilité de l'état du vide dans la théorie des supercordes.

Les yeux pour penser et pour communiquer

Aussi, à celui qui dit qu'il serait « facile pour lui d'être un astrophysicien, parce que tout est dans la tête, aucune habileté physique n'est requise », on peut objecter que pour penser, il faut bien utiliser ses mains, et si on ne le peut pas, celles des autres, mais surtout ses yeux pour regarder ces derniers travailler, écrire, calculer et dessiner.

Depuis 1986, date à laquelle il a subi une trachéotomie, Hawking a perdu sa voix et communique grâce à un ordinateur, les mots proposés par celui-ci étant sélectionnés via un mouvement de l'œil, tandis qu'un synthétiseur peut énoncer vocalement ce qu'il a écrit. Le processus étant assez lent, ses étudiants communiquent souvent avec lui en lui posant des questions auxquelles il répond par oui ou par non en haussant (ou non) un sourcil.

Aussi, de la même façon que le physicien a développé une façon de sélectionner les informations que lui soumet son environnement (humains ou machines) en haussant ou non un sourcil, il pourra, simultanément, mobiliser et sélectionner un certain nombre d'informations à partir de diagrammes dessinés sous ses yeux. Ses yeux vont ainsi devenir le point d'articulation et d'activation de ce réseau



TROIS EXEMPLES DE DIAGRAMMES DE PENROSE-CARTER, qui permettent de résumer sur un schéma les liens de causalité au sein d'un espace-temps, en fonction de la géométrie qui le caractérise. Pour travailler, Stephen Hawking a besoin de ces diagrammes, que ses étudiants sont chargés de dessiner.

« UNE MERVEILLEUSE HISTOIRE DU TEMPS »



Le film de James Marsh *Une merveilleuse histoire du temps* est émouvant. Comment pourrait-il en être autrement ? On y voit un homme jeune et brillant se confronter à l'annonce d'une mort subite, une femme belle et aimante se sacrifier pour lui. Mais tandis que l'on voit le scientifique devenir de plus en plus dépendant d'elle pour vivre et communiquer, on ne s'étonne pas une seconde du fait qu'il puisse continuer à faire de la science, car la science, elle, semble être l'unique produit de l'esprit. Les travaux de Hélène Mialet, l'auteur, montrent l'inverse en réintroduisant le rôle d'un corps collectif composé d'individus, de machines et de dispositifs intellectuels sans lesquels Stephen Hawking, mais également tout scientifique, ne pourrait penser.

BIBLIOGRAPHIE

H. Mialet, *A la recherche de Stephen Hawking*, Odile Jacob, 2014 (en anglais : *Hawking Incorporated*, University of Chicago Press, 2012).

H. Mialet, blog sur *Scientific American*, 31/12/2014 : <http://bit.ly/140fVnJ>

H. Mialet, *On Stephen Hawking, Vader and being more machine than human*, *Wired*, janvier 2013 (www.wired.com/2013/01/hawking-machine-man-robots/).

H. Mialet, *The extended body of Hawking*, *Interdisciplinary Science Review*, vol. 37(4), pp. 354-371, 2012.

H. Mialet, *La statue de Stephen Hawking, ou comment se représenter la science de son vivant*, dans S. Houdart et O. Thiery (éds.), *Humains, non-humains*, La Découverte, 2011.

de compétences composé d'individus, de machines et d'outils théoriques.

Le plus souvent, il demandera à voir les diagrammes de Penrose-Carter – une application directe des méthodes d'étude globale en théorie de la relativité générale, inventées par le mathématicien britannique Roger Penrose dans les années 1960. En général, Hawking utilise cette technique lorsqu'on lui parle d'un certain univers, d'un certain espace, par exemple un espace-temps où deux trous noirs accélèrent l'un par rapport à l'autre, ou d'une certaine solution des équations d'Einstein (qui relient la géométrie de l'espace-temps à son contenu en matière et énergie). Un diagramme de Penrose-Carter est un outil graphique qui permet de visualiser « l'univers en entier » dans une image de taille finie, traduisant elle-même une équation parfois compliquée. Grâce au diagramme, le savant peut dominer du regard ce qui, autrement, le dépasserait complètement et de fait serait invisible.

Ainsi, l'ingéniosité du diagramme de Penrose-Carter permet d'appréhender « en un clin d'œil » les liens de causalité d'un univers entier. Comme le mentionne le cosmologiste américain Alan Guth, « il

déforme l'espace de façon à ce que la lumière se propage en ligne droite, ce qui est très utile pour comprendre comment différents points sont connectés les uns avec les autres, rien ne pouvant se propager plus vite que la lumière. » Grâce à ce dispositif, il est possible de faire des courts-circuits : « C'est très pratique, il n'y a pas de besoin de faire 40000 calculs, confirme l'étudiant de Hawking, ça se voit. » Un diagramme de Penrose-Carter est donc un outil heuristique permettant de visualiser un espace « qui devient intuitif sous certains aspects ».

Le rôle clef des étudiants

En d'autres termes, le point de vue global, les connexions, les courts-circuits, la capacité intuitive que l'on attribue au pouvoir de l'esprit de Hawking sont en partie le produit de ces outils. En ce sens, le handicap de ce chercheur rend visible un style de pensée visuelle ou « diagrammatique ». Mais, à nouveau, comme nous l'avons vu, s'il ne peut pas utiliser ses mains pour écrire et manipuler des équations, il lui est également impossible de dessiner ces diagrammes. Ses étudiants sont donc chargés de le faire pour lui. Et de fait, pour pouvoir travailler avec lui, de la même façon qu'ils auront développé une façon de communiquer avec lui en lisant le langage de son corps, ils devront apprendre à parler et à écrire dans la même langue... diagrammatique.

Or la tâche est loin d'être simple. Savoir lire un diagramme de Penrose-Carter n'exige pas de compétences surhumaines ; tout étudiant avancé apprend à maîtriser cet outil devenu standard dans le domaine de la relativité générale ; il doit donc savoir pourquoi on le fait et comment on l'obtient en équation, mais on ne lui demande pas forcément d'être en mesure de le dessiner. La difficulté est d'autant plus grande qu'il faut d'abord connaître la géométrie d'un espace-temps avant de pouvoir la transformer en un diagramme. En d'autres termes, le diagramme est une certaine traduction de cette géométrie, elle-même solution des équations d'Einstein.

En bref, pour pouvoir visualiser, il faut qu'il y ait d'abord eu calcul. Des calculs effectués par des étudiants habiles, triés sur le volet et formés à certaines méthodes. Travaillant sans relâche, ils « découvrent » des espaces et adaptent ces diagrammes. Enfin, à chaque fois qu'on lui montre un nouveau diagramme, Hawking peut le mémoriser :

«Et quand il l'a vu une fois, il l'a dans la tête», dit l'un de ses étudiants. C'est ainsi que certains expliquent sa productivité.

Hawking a certainement poussé plus loin que d'autres ce travail de mémorisation des diagrammes, faute de pouvoir alléger ses tâches cognitives en dessinant lui-même ces schémas. Cependant, pour jouer leur rôle dans le raisonnement scientifique, ces diagrammes ne peuvent rester gravés uniquement dans sa mémoire. Ils doivent être mobilisés, redessinés, rendus visibles sous les yeux du scientifique à chaque fois qu'un problème se pose, soit parce qu'il le demande explicitement, soit parce que ses étudiants anticipent sa demande. Nous sommes loin ici de l'image du génie solitaire.

Aussi, contrairement à ce que l'on dit de Hawking (et à ce qu'il dit de lui-même), à savoir que tout serait «dans la tête», il doit déléguer plus que tout autre et, qui plus est, de personne à personne. Ce sont ses étudiants qui calculent et dessinent. Ce sont eux également qui font le travail de la preuve, qui étendent, traduisent, réinterprètent et recontextualisent ses idées. Tous

les aspects fondamentaux de la «science pure» – pensée, preuve, calcul, contexte de découverte et de justification, réception du travail scientifique – sont incorporés et distribués dans le laboratoire.

Une multiplicité de corps étendus

Ainsi, bien que Hawking incarne la représentation du génie et, par extension, la conception traditionnelle de la science – un monde fait de théories produites ou trouvées rationnellement, un monde de chercheurs neutres et objectifs vivant dans un monde de pensée pure –, il est en réalité matérialisé et distribué dans une série de collectifs liés entre eux et se recouvrant partiellement. Tout est long, tout est difficile et tout est rendu possible par cet ensemble de prothèses humaines, mécaniques et intellectuelles qui lui permettent d'être, d'agir et de penser.

Si Hawking a bien un corps, il a également ce que j'ai appelé une multiplicité de corps étendus, dont il est à la fois un

élément et un produit. Cela signifie-t-il que ce scientifique soit le seul à dépendre de ce genre de collectif? Non, évidemment. Parce que son handicap l'oblige à déléguer plus que tout autre, Hawking rend visible ce que trop souvent l'on ne voit pas : le fait que les scientifiques ne peuvent pas penser sans être attachés à des instruments, des machines, des outils théoriques, des techniques, des étudiants et des institutions.

Cela nous permet également de repenser différemment la question du «génie». Est-ce que tout est dans sa tête, comme la presse aime souvent à le représenter? Non, c'est plutôt l'inverse; tout se situe à l'extérieur de son cerveau et se fait et refait par les outils et par les personnes qui sont autour de lui. Hawking est-il donc une pure construction sociale? Évidemment non, il est entièrement nourri par un réseau, qu'il alimente en retour. Il est un produit de toutes ces associations, mais il est aussi bien plus... C'est un homme qui, plus qu'un autre, est collectivisé. Il est de ce fait plus singulier et, du même coup, plus visible. Il est, ce que j'ai appelé, un sujet distribué-centré. ■

france culture C'EST POUR VOUS

LA MARCHÉ DES SCIENCES

AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE
AURÉLIE LUNEAU / JEUDI 14H - 15H

EN PARTENARIAT AVEC POUR LA SCIENCE

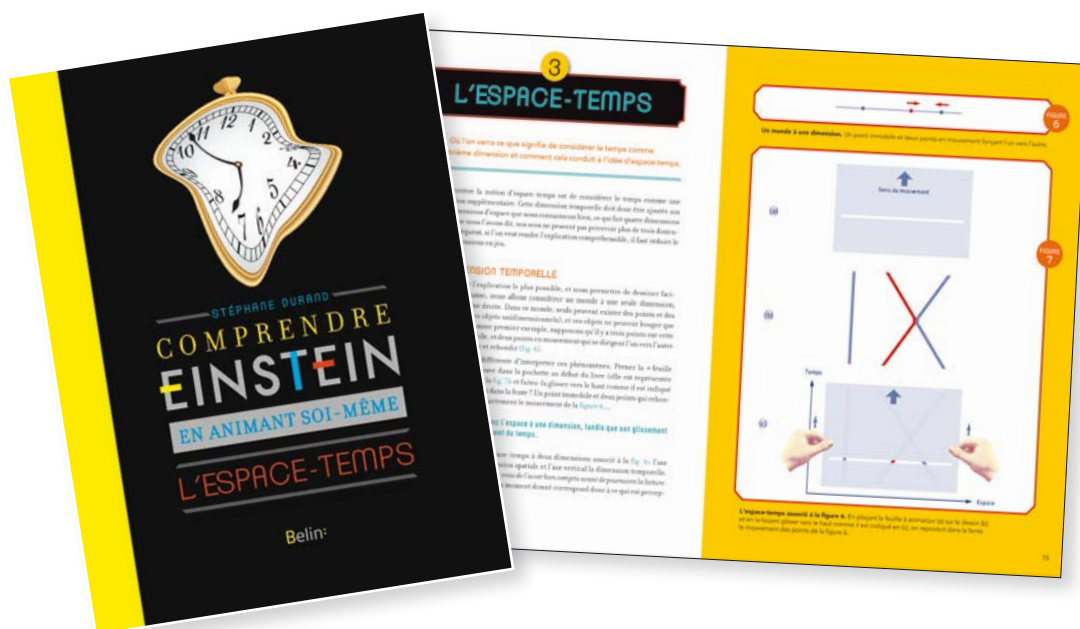
écoutez réécoutez et podcastez l'émission sur franceculture.fr

QR code and social media icons (Facebook, Twitter)

La sélection de livres

POUR LA SCIENCE

Une sélection de livres ludiques et illustrés ou à petits prix pour tout comprendre de la chimie, animer soi-même l'espace-temps, retracer l'histoire des grandes découvertes scientifiques des années 60 ou encore devenir le meilleur ami des robots !



Comprendre Einstein en animant soi-même l'espace temps

Stéphane Durand

Réf. 70118355

Un ouvrage ludique pour devenir le maître de l'espace-temps à l'aide de schémas à animer soi-même. Voilà une manière très originale de trouver des réponses à des questions que l'on n'ose pas poser sur l'une des théories les plus ardues de la physique !

Éditions Belin 2014
96 pages - 15 € - 978-2-7011-9284-0



La science des sixties

Les avancées remarquables au temps des yéyés et de la Guerre froide

Dirigé par Olivier Néron de Surgy et Stéphane Tirard

Réf. 70118355

Un livre richement illustré qui porte un regard inédit sur l'implication des sciences dans le « bouillonnement culturel » des années 1960 et ses conséquences durables sur notre société.

Éditions Belin 2014
216 pages - 22,90 € - 978-2-7011-8355-8

En partenariat avec les éditeurs

Belin:
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777

Le Pommier

Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie

ou en renvoyant le bon de commande ci-contre.



Drôle de chimie (nouvelle édition)

Pierre Laszlo

Réf.*74650882

Nourrir, vêtir, soigner, chauffer, transporter l'humanité, les 19 chapitres de ce livre nous permettent de faire la part des risques et des bienfaits d'une industrie trop peu connue. Cette édition est entièrement mise à jour.

Editions Le Pommier 2015
400 pages - 10 € - 978-2-7465-0882-8



La logique

Gilles Dowek

Réf.*74650878

Les outils et les méthodes de la logique, pour comprendre le sens du raisonnement.

Editions Le Pommier 2015
128 pages - 7 € - 978-2-7465-0878-1



De la Joconde aux tests ADN, jusqu'où ira la chimie ?

Stéphane Sarraide

Réf.*74650884

Grâce aux progrès de la chimie, il est aujourd'hui possible de quasiment tout mesurer. La chimie sera-t-elle le nouveau big brother ?

Editions Le Pommier 2015
128 pages - 7,90 € - ISBN 978-2-7465-0884-2



Le robot, meilleur ami de l'homme ?

Rodolphe Gelin

Réf.*74650883

Le robot est-il l'avenir de l'homme ? Un livre qui expose l'état actuel de cette technologie dont tout le monde semble savoir ce qu'elle sera dans plusieurs dizaines d'années sans vraiment avoir une idée de ce qu'elle est vraiment aujourd'hui....

Editions Le Pommier 2015
128 pages - 7,90 € - 978-2-7465-0883-5

BON DE COMMANDE

A retourner accompagné de votre règlement à :
Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil

☐ **Oui, je commande les livres** présentés dans la sélection de *Pour la Science*. Je reporte les titres, prix et références à 6 chiffres correspondant aux ouvrages choisis :

Titre	Réf.	Prix
		€
		€
		€
		€
		€
		€
Frais de port (4,90 € France - 12 € étranger) +		€
Total à régler =		€

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

C.P. : _____ Ville : _____
Pays : _____ Tél. : _____
E-mail : _____

pour recevoir la newsletter Pour la Science : à remplir en majuscules

Je choisis mon mode de règlement :

☐ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
☐ par carte bancaire

Numéro : _____
Date d'expiration : _____
Cryptogramme : _____

Signature obligatoire

Belin
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777

Le Pommier

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 la case ci-contre ☐

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

DPL448 offre valable jusqu'au 28/02/2015 dans la limite des stocks disponibles

Un teinturier du Languedoc à la conquête du Levant

Un mystérieux carnet de teinturier éclaire l'importance, au XVIII^e siècle, de la maîtrise des couleurs dans la guerre commerciale que se livraient les draperies européennes pour remporter les marchés orientaux.

Dominique Cardon

Juillet 2009. Le hasard m'a mise sur la route d'un curieux manuscrit : un document regorgeant de recettes de teinture et d'échantillons de tissu teints de toutes les couleurs. Quelques jours plus tôt, un ancien professeur de botanique de l'Université de Montpellier l'avait mentionné à un de mes amis historien. Sa famille se transmettait le manuscrit depuis plusieurs générations et il se demandait s'il ne serait pas important de le publier. Aussitôt alertée par mon ami, me voilà chez le professeur, découvrant l'objet.

Le document est un trésor rarissime pour une historienne des techniques : non seulement un nom y définit chaque couleur, mais des recettes détaillées permettent de reproduire ces couleurs. De plus, 177 échantillons de fin drap de laine aux teintes parfaitement conservées concrétisent leur valeur coloristique. Les questions jaillissent. Pas de signature ni de date, nulle mention de lieu connu dans le manuscrit : par qui, quand et où a-t-il été rédigé ? Aucune information précise à son sujet ne s'est transmise dans la famille qui en a hérité. Il est toujours allé de soi qu'il devait provenir d'un ancêtre, drapier vers la fin du XVIII^e siècle.

Décision prise d'éditer ces *Mémoires de teinture*, commence alors un patient travail de recherche historique. Au fil de l'enquête, un lieu se dessine, puis une période et, enfin, un homme,

parvenu à un moment de sa vie où il a décidé de donner à son savoir de praticien une chance de bénéficier à d'autres et de lui survivre. Un homme qui, jour après jour, a consigné ses notes, les illustrant de petits bouts des draps tout juste sortis des cuves et chaudrons de sa teinturerie. C'est un fou de couleurs que l'on démasque finalement, qui orchestrait l'intense activité d'ateliers fumant de la vapeur des immenses cuves de teintures bouillantes d'où sortaient, année après année, des kilomètres de draps de laine de toutes nuances. Acheminés vers Marseille, ils étaient embarqués pour les échelles du Levant, ces ports de la Méditerranée orientale ouverts au commerce entre l'Europe occidentale et l'Empire ottoman.

En quête de sources

Habituellement, quand un(e) historien(ne) parle de sources, il s'agit de sources écrites – grimoires, manuscrits... Dans le cas présent, mon enquête a bel et bien commencé par la recherche de vraies sources d'eau : un nom de source était le seul indice précis de l'endroit où avait été rédigé le manuscrit. Dès la première page, l'auteur des *Mémoires* avait circonscrit le cadre de son propos aux « teintures que nous faisons en Languedoc pour le Levant ». Mais l'indice était mince. Durant tout le XVIII^e siècle, la draperie destinée à l'exportation vers

les échelles du Levant florissait dans tout le Languedoc. Où chercher dans cette province très étendue ?

Le dernier des quatre mémoires réunis

dans le manuscrit – le plus personnel – livrait cependant une chance de le deviner. L'auteur y a consigné au jour le jour, comme dans un carnet de laboratoire, les résultats de ses expériences visant à optimiser les coûts de production de ses couleurs sans en amoindrir la qualité. Décrivant les conditions dans lesquelles il réalise ces essais, il commence par ses ressources en eau, élément vital pour tout teinturier.

On apprend ainsi que la Manufacture royale dans laquelle il officie – mais dont il ne donne pas le nom – est approvisionnée en « eaux très mauvaises » : pour la teinture des draps, elle a accès à une rivière – non nommée – dont l'eau, trop « chaude par elle-même, est encore infectée par la source de Las Fons qui y domine les trois quarts de l'année ». « Las Fons » signifiant « les sources », le seul espoir de trouver le lieu se réduisait à un seul nom : « La Bouilhete », une source qui, selon l'auteur, était canalisée vers le moulin où étaient foulonnés les draps et donnait une eau désespérément « molasse »...

Chercher une source dans le réseau hydrographique d'une région : autant chercher une aiguille dans une meule de foin. Mais une information a facilité l'entreprise. La mention d'une Manufacture royale a permis de limiter

la zone de recherche : en janvier 1735, les États du Languedoc avaient fixé leur nombre à 12. Partant de là, en moins d'un an, avec le concours de nombreux chercheurs bénévoles, nous avons identifié le lieu où sourd encore La Bouillette ; où une rivière, la Cesse, coule toujours au pied de l'ancienne Manufacture royale et où les sources bouillonnantes, en contrebas des grottes de Las Fons, mêlent leurs eaux tièdes dans une grande vasque rocheuse. Ce lieu est Bize-en-Minervois, dans l'Aude, dont la Manufacture de draps devint royale en 1733.

D'autres sources – littéraires, cette fois – m'ont alors révélé à quelle période de l'histoire de cette Manufacture a écrit l'auteur. Car, pour étoffer son premier mémoire sur « les drogues de teinture » et leurs différentes qualités et provenances, il a puisé des phrases entières dans la multitude d'ouvrages de vulgarisation scientifique et technique qui voyaient le jour chaque année en ce siècle des Lumières. La parution la plus tardive citée est celle du *Dictionnaire domestique portatif*, contenant toutes les connoissances relatives à l'oéconomie domestique et rurale, d'Aubert de La Chesnaye-Desbois, Roux et Goulin, en 1762. Les *Mémoires* ont pu ainsi être rédigés dans une période de deux à trois ans à partir de cette date.

La guerre de Sept Ans (1756-1763) et ses conséquences économiques fournissent d'autres repères, confortant cette estimation : l'auteur des *Mémoires* déplore encore la hausse du prix de l'alun de Rome entraînée par la guerre. Cette matière première était indispensable pour la bonne fixation des teintures. Mais il constate déjà un début de reflux du prix de la cochenille d'Amérique – colorant le plus cher de l'époque – dont le cours s'était, lui aussi, envolé à cause des hostilités en mer. Il a ainsi dû commencer à écrire vers la fin de la guerre, profitant du



DANS LES MÉMOIRES DE L'ÉNIGMATIQUE TEINTURIER, des échantillons accompagnent chaque couleur. La première présentée est le bleu, car c'est « une couleur primitive, et la baze de la majeure partie de celles du grand teint ». Les différents degrés de bleu dépendent du nombre de trempages des pièces dans d'immenses cuves de pastel renforcées à l'indigo.

ralentissement forcé des affaires et avant le grand élan productif de l'après-guerre.

Or, entre cette période et sa cessation d'activité durant la Révolution, la Manufacture royale de Bize est restée la propriété du « groupe Pinel », un puissant consortium familial de négociants et fabricants de Carcassonne, tout en étant dirigée, avec passion, par l'entrepreneur à qui les Pinel l'ont confiée en 1757 : Paul Gout. Ce Paul Gout est donc, durant toutes ces années, la seule personne qui, résidant à Bize, y organise et supervise toutes les opérations de la teinturerie installée dans la Manufacture, peut avoir à se plaindre des eaux qui l'alimentent... et peut se permettre de prélever des échantillons sur les draps qui y sont fabriqués.

« Gout de Biz », entrepreneur de génie

Cette identification épaissit le mystère entourant la destinée du manuscrit, car ses propriétaires actuels ne descendent ni des Gout ni des Pinel et ne se connaissent pas d'attaches familiales à Bize. En revanche, elle enrichit le texte des *Mémoires* de tout un contexte personnel, économique et social, au fil des apparitions de Paul Gout dans les archives du Languedoc concernant la draperie, ou dans les registres paroissiaux de Bize, dont il devint l'un des quatre seigneurs en 1766.

On y découvre le parcours d'un homme passionné de son métier. Durant toute la seconde moitié du XVIII^e siècle, dans un contexte de féroce concurrence avec les drapiers hollandais et anglais, il réussit à maintenir « sa » Manufacture à un niveau de production qui la plaçait au deuxième rang des Manufactures du Languedoc. Un haut rang dans cette région d'où, dès le Moyen Âge, partaient chaque année vers la Méditerranée orientale des bateaux chargés de draps de toutes couleurs.

Face aux « derrangements que cause la guerre » de Sept Ans dans l'écoulement de sa production, Gout n'hésite pas à défier l'Intendant du Roi en Languedoc. Celui-ci lui refusait la permission de fabriquer des draps moins chers que les londrins seconds. Inspirées à l'origine d'un modèle anglais, ces étoffes tissées avec les plus belles laines d'Espagne

L'AUTEUR



Dominique CARDON est directrice de recherche émérite au centre Histoire et archéologie

des mondes chrétiens et musulmans médiévaux (UMR 5648, CNRS), à Lyon.

À ÉCOUTER

Le jeudi 12 février 2015, de 14h à 15h, Dominique Cardon reviendra sur l'histoire de ce mystérieux manuscrit de teinturier dans la partie *Actualités* de l'émission *La marche des sciences* sur France Culture. www.franceculture.com



LES COULEURS SE SUIVENT

dans le dernier mémoire du manuscrit, comme les idées dans un journal intime. Et toujours annotées de protocoles précis, à l'instar de toutes celles disséminées dans cet article...

étaient devenues la grande spécialité des meilleurs fabricants languedociens et leur principal produit d'exportation. S'indignant, après s'être « épuisé pour entretenir [ses] ouvriers », qu'il ne lui soit « pas permis de faire usage du seul moyen qu'il [lui] reste aujourd'hui de pourvoir à leur subsistance », il menace d'en appeler à la fibre sociale du Ministre d'alors, Trudaine :

La majeure partie des ouvriers de la province manquant d'ouvrage aujourd'hui, le Ministre devrait savoir gré aux fabriquands qui leur en fournissent. C'est là mon motif. Je me flatte, Monseigneur, que vous le trouverez juste, et que vous voudrez bien me dispenser de m'adresser à Mr le Contrôleur Général pour la ditte permission.

L'affaire remonta tout de même jusqu'à Versailles... et Gout obtint son autorisation. Les années d'après guerre sont les plus florissantes pour la Manufacture avec, dès 1764, une production record de 1 255 pièces de londrins seconds, plus 120 « draps fins ».

Impressionnant ? La réalité technique, reconstruite en combinant archives, réglementation et texte des *Mémoires*, l'est encore plus. Les pièces de drap sont des « doubles pièces » de 36 à 40 mètres de longueur, si larges – 2,30 mètres – qu'il faut deux tisserands pour les fabriquer, assis côte à côte sur d'immenses métiers à drap. Du temps de Gout, 50 machines de ce gabarit battent dans Bize. Avant d'être teintes, les pièces sont coupées en deux longueurs, « demi-pièces » afin d'offrir plus de choix de couleurs aux clients du Levant. Chaque bain de teinture, préparé dans d'énormes chaudrons de cuivre ou de laiton pesant entre 200 et 300 kilogrammes, engouffre cinq à six demi-pièces de 10 à 12 kilogrammes, soit environ 62 kilogrammes de tissu sec. On imagine le poids à manier pour les ouvriers teinturiers quand elles sont imbibées de teinture !

En 1764, 1 375 doubles pièces de drap ont été teintes à Bize en une année, soit près de huit demi-pièces par jour, en ne décomptant aucun jour férié. Images de ruche humaine, de chassés-croisés de pièces de draps d'une chaudière fumante à l'autre, mêlés d'allers et venues en brouettes et charrettes entre la teinturerie, le foulon et la rivière...

Que vient donc faire l'entrepreneur dans cette galère ? Organiser le travail, gérer l'espace, l'équipement, le combustible, l'eau, les matières premières ; regarder à quoi ressemble chaque pièce sortie de la teinture, l'y faire replonger ou l'envoyer à nuancer dans un autre chaudron.

La guerre des couleurs

Que le directeur d'une Manufacture ait une telle connaissance de l'art de la teinture et qu'il prenne le temps d'écrire sur cet art, cela ne surprend personne à l'époque. Ni les fabricants ni les inspecteurs des manufactures, et encore moins les négociants des échelles, parce que « la perfection de la teinture est [...] l'apré l'plus considérable et le plus essentiel que l'on donne aux marchandises et c'est le deffaut, ou la perfection de cet aprest qui en procure le rebut ou la

vente », comme l'affirme en 1731 un expert carcassonnais. Sur quoi renchérit Jacques Savary dans son *Parfait négociant* (1675) : « Les Turcs, les Arméniens et les Persans sont très difficiles pour les couleurs » ; à Constantinople, « la vivacité des couleurs [des draps] en cause le débit ».

Or ces pays, producteurs de merveilleuses soieries et de fabuleux tapis, dépendent, pour leur approvisionnement en draps de laine, de l'importation à partir des grands centres textiles européens. La draperie, telle qu'elle s'est développée en Europe au Moyen Âge, est en effet une filière technique complexe, exemple d'émergence d'une organisation de type industriel : le rapport qualité/prix des draps produits est inaccessible aux ateliers artisanaux du monde oriental.

Mais les élites de ces pays d'amateurs de couleurs ont leurs exigences : elles attendent

de leurs fournisseurs qu'ils répondent avec la plus grande célérité aux fluctuations de leurs goûts et des modes : « Surtout il faut observer les assortiments des balles, pour les couleurs qui changent icy presque deux fois l'année, on aura soing de les envoyer tous les six mois », recommande l'auteur d'un *Mémoire* écrit du Levant vers 1680. Outre la beauté des couleurs, c'est la réactivité des fabricants qui assure, durant toute la seconde moitié du XVIII^e siècle, le triomphe des draps languedociens sur ceux des Hollandais et des Anglais, plus lents à arriver.

La question de la qualité des teintures est donc à la fois technique, économique et politique. Un bon directeur de Manufacture royale se doit d'être informé de tout ce qui concerne la teinture – procédés, perfectionnements techniques réels ou prétendus tels, réglementation. S'il a en plus un peu de génie, tant mieux.

De l'écarlate de feu au chair pâle : une leçon d'économie

La cochenille d'Amérique est le colorant le plus coûteux de l'époque : son seul prix d'achat pour la teinture des rouges intenses demandés au Levant représente 5 % du coût total de fabrication d'une balle de drap, alors que la teinture dans toutes les autres couleurs – matières premières et main d'œuvre comprises – revient à 8 % de ce coût. Pour comparaison : le salaire des tisseurs et de leurs caneteurs compte seulement pour 7,3 à 8 %. D'où l'adoption par Paul Gout d'un système de recyclage en cascade des bains de teinture à la cochenille.

Dans un envoi de dix ballots de draps de Bize vers le Levant où la couleur de chaque pièce est indiquée, 45 % des nuances utilisent la cochenille. Celle-ci est d'abord mise à raison de 7 % du poids des draps secs dans les bains de teinture pour les écarlates, cramoisis et « soupevins » (contre 5 % pour les draps écarlates de l'Ouest de l'Angleterre). C'est l'éclat de ces rouges

languedociens qui a conquis les marchés du Levant.

Pour rentabiliser et épuiser le précieux colorant jusqu'à la dernière molécule, des recyclages des bains en cascade vont donner des « suites » de rouges et roses de plus en plus clairs, nuancés d'orange ou beige à l'aide de teintures peu chères telles que le fustet ou la noix de galle : fleur de grenade, griotte, jujube, cerise, langouste, rose, fleur de pêcher, orange, abricot, chamois, café au lait, chocolat au lait, jonquille, biche, chair pâle...

Économie, effluents limpides, pollution nulle... Il ne restait plus qu'à vendre aux élégantes Orientales la mode de ces nuances beige-rose évanescences !

ÉCARLATE DE FEU, soupevin, cerise, rose, chair, chair pâle, jonquille, chamois, biche, café au lait, chocolat au lait sont quelques-unes des teintes répertoriées dans le manuscrit (*de haut en bas et de gauche à droite*).



BIBLIOGRAPHIE

D. Cardon, *Mémoires de teinture. Voyage dans le temps chez un maître des couleurs*, CNRS Éditions, 2013.

D. Cardon, *Le Monde des Teintures naturelles*, 2^e édition augmentée, Belin, 2014.

P. Minard, *Réputation, normes et qualité dans l'industrie textile française au XVIII^e siècle*, dans A. Stanziani, *La qualité des produits en France (XVIII^e-XX^e siècles)*, pp. 69-89, Belin, 2003.

C. Marquié, *L'industrie textile carcassonnaise au XVIII^e siècle. Étude d'un groupe social : les marchands-fabricants*, Société d'études scientifiques de l'Aude, 1993.

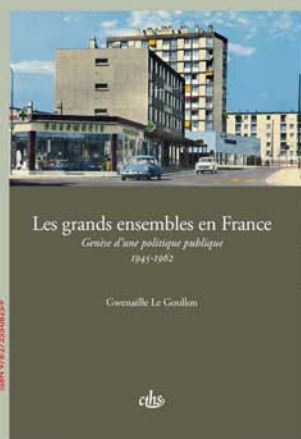
C'est de tout cela dont témoignent les *Mémoires de teinture*, plus ancien traité connu sur la teinture des draps de laine écrit par un entrepreneur en activité et illustré d'échantillons de tissu. En gestionnaire d'une grande entreprise confrontée à une féroce compétition internationale, soucieux de serrer au maximum le prix d'achat de ses matières premières – colorants et mordants –, Paul Gout a rassemblé toutes les informations sur ces « drogues » dans un premier mémoire.

En teinturier formé par les meilleurs maîtres de sa région et convaincu de la pertinence des Règlements royaux sur la teinture des draps de laine en grand teint édictés du temps de Colbert, il a rédigé le second. Enfin, à la fois en chimiste empirique, en coloriste et, de plus en plus, en funambule de « l'économie de la qualité », il a terminé son œuvre par un extrait de son carnet de bord d'entrepreneur de

Manufacture royale, dans lequel sont notées des expériences de reproduction des couleurs de grand teint à moindres frais : économies sur les quantités d'ingrédients, rattrapées par des astuces chimiques, introduction à petites doses de colorants interdits pour la fugacité de leurs teintures – campêche et bois rouges exotiques, bleus et verts de Saxe obtenus en dissolvant l'indigo dans l'acide sulfurique... Les mesures actuelles de colorimétrie confirment que ces astuces produisent bien un effet identique !

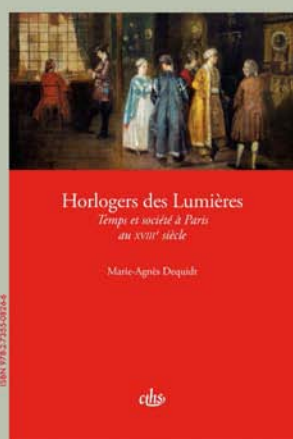
Ce chef d'œuvre de la littérature technique, exemple de génie entrepreneurial, modèle d'économie et d'écologie pour une économie verte, commence une deuxième vie : il est devenu une source d'inspiration pour la « slow fashion », un mouvement de jeunes créateurs de mode qui revient vers les teintures naturelles. ■

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques une collection complète d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines



Les grands ensembles en France
Gwenaëlle Le Goulon

360 pages
15 x 22 cm
br.
28 €



Horlogers des Lumières
Marie-Agnès Dequidt

400 pages
15 x 22 cm
br.
29 €

Actuellement
en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE

Le cri du cœur de Jane GOODALL

La plus célèbre
spécialiste des
chimpanzés ne veut
pas baisser les bras



DOSSIER POUR LA SCIENCE - PRIMATOLOGIE - PALÉONTOLOGIE - ÉTHOLOGIE - PSYCHOLOGIE

Leur avenir est entre nos mains

Nos cousins les grands singes



LE YÉTI A EXISTÉ !

Les humains l'ont
rencontré il y a
3 millions d'années

LES GORILLES

De nouvelles
preuves
de leur culture



N° 86 Janvier-Mars 2015

pouirlascience.fr

n° 86 - 120 pages - prix de vente : 6,95 €

www.pouirlascience.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale



Disponible sur



LOGIQUE & CALCUL

Les mathématiques de l'origami

Si l'art du papier plié remonte à plusieurs siècles, son étude mathématique est récente et révèle des liens étroits avec l'algèbre, la théorie des nombres ou l'algorithmique.

Jean-Paul DELAHAYE



L'origami est l'art de plier du papier pour en faire une sculpture, soit géométrique, par exemple une boîte ou un polyèdre, soit figurative – un animal, une fleur, un personnage, etc. Dans la forme pure de l'origami, on part d'une feuille carrée, et seuls sont autorisés des plis rectilignes sans découpage aux ciseaux. Dans d'autres formes de l'art du papier, on accepte l'utilisation de plusieurs feuilles pour une même construction (origami modulaire), leur découpage et leur collage, le mouillage du papier pour en fixer la forme, ou encore l'aide d'outils pour dessiner des plis arrondis.

L'origami, en tant qu'art du pliage sans découpage ni collage à partir d'une feuille carrée, est né au Japon au XVII^e siècle et s'est répandu dans le monde entier au XIX^e. Son histoire plus ancienne est difficile à établir car les œuvres se conservent mal, mais des jeux de pliages ont certainement existé en Chine, en Italie, en Allemagne et en Espagne bien avant le succès mondial de ce délicieux passe-temps créatif.

L'étude mathématique de l'origami commencée dès 1907 a connu des progrès considérables depuis 30 ans et s'est révélée d'une grande richesse. On a su démontrer de remarquables résultats permettant en particulier de savoir quels nombres étaient « constructibles par origami ». Ces nombres sont analogues à ceux « constructibles à la règle et au compas » qui, au XIX^e siècle, ont permis de résoudre (par la

négative) le problème de la quadrature du cercle. Depuis 1989, il existe d'ailleurs un congrès international consacré aux aspects mathématiques de l'origami et à son utilisation dans l'enseignement. La sixième édition de ce congrès s'est réunie en août 2014 à Tokyo.

Les quelques théorèmes que nous allons présenter constituent les bases d'une discipline qui s'étend et semble d'ailleurs devoir jouer un rôle aussi bien en biologie (où le repliement des protéines est un problème central) que dans le domaine des technologies nouvelles où la conception de structures reconfigurables, éventuellement microscopiques, demande une compréhension toujours plus fine des opérations d'articulation et de pliage.

Les canevas de plis

Commençons par nous concentrer sur l'origami pur qui, partant d'une seule feuille de papier carrée, consiste à utiliser des plis rectilignes afin d'arriver à une forme repliée plate. En France, le plus connu de ces pliages purs est la cocotte en papier. Au Japon, c'est un autre oiseau : la grue, plus élégante mais aussi plus difficile.

Prenez une feuille et faites la cocotte (voir l'encadré ci-contre ou la vidéo www.youtube.com/watch?v=770X1FJLLIo). Une fois le résultat obtenu, dépliez la feuille et considérez les dessins marqués sur cette feuille par les plis (uniquement ceux

vraiment utiles à la forme finale) en les dessinant en rouge et en bleu : le rouge pour les plis « montagne », le bleu pour les plis « vallée ». Vous avez obtenu ce qu'on nomme le « canevas de l'origami » (*crease pattern* en anglais). Ne croyez pas que n'importe quel schéma de traits rectilignes bleus et rouges est un canevas possible. Deux théorèmes principaux indiquent les règles que vérifie tout canevas d'origami. Ces règles permettent de déceler d'éventuelles erreurs dans le dessin d'un canevas.

Le premier de ces théorèmes indique que les nombres de traits rouges R et de traits bleus B se rencontrant en un point intérieur à la feuille doivent vérifier : $R = B + 2$ ou $R = B - 2$.

Ce théorème, découvert en 1989 par le Français Jacques Justin et redécouvert par la suite par le Japonais Jun Meakawa devrait porter le nom du Français, mais l'usage en a décidé autrement : aujourd'hui, tout le monde désigne par « théorème de Meakawa » cette remarquable propriété ! N'est-il pas étonnant que cette règle très simple et qu'on démontre assez facilement ait attendu aussi longtemps pour être identifiée ? Elle est d'une réelle utilité pour dessiner des canevas justes.

L'encadré ci-contre illustre ce théorème ainsi que d'autres propriétés des canevas d'origamis purs. On y explique aussi que la question de savoir si un canevas satisfaisant les deux théorèmes principaux peut

Cocottes, canevas et théorèmes de l'origami

Les instructions pour obtenir la célèbre cocotte en papier sont indiquées ici (a). Le gallinacé obtenu, remettons la feuille à plat et examinons soigneusement les plis (b).

Il y en a trois catégories :

Les plis montagne (en rouge).

qui sont ceux où la feuille pliée forme une ligne de crête de la cocotte repliée.

Les plis vallée (en bleu) où, à l'opposé, la feuille pliée présente un creux.

Quelques autres plis (en gris)

ont été utilisés lors de la construction, mais sont à plat dans la forme pliée finale.

Les canevas qui nous intéressent sont ceux des plis finaux. Leurs propriétés mathématiques spécifiques sont :

Propriété 1. Les zones (c, en jaune et en vert) de la feuille délimitées par les plis montagne ou vallée sont coloriables avec deux couleurs sans que deux zones voisines soient de la même couleur.

Propriété 2. Tout sommet du graphe dessiné par les plis rouges ou bleus et intérieur à la feuille vérifie le théorème de Maekawa : il s'y rejoint soit deux arcs rouges de plus que d'arcs bleus, soit deux arcs bleus de plus que d'arcs rouges. Ici, il y a quatre nœuds intérieurs à la feuille et s'y rencontrent quatre arcs rouges et deux bleus (en haut à gauche), ou (pour les autres) trois arcs bleus et un rouge. Ainsi, le nombre d'arcs se rencontrant en un sommet intérieur est pair, ce qui implique d'ailleurs la propriété 1.

Propriété 3. Les angles formés par les arcs (en nombre pair) concourant en un sommet intérieur ($a_1, a_2, \dots, a_{2n}$) vérifient le théorème de Kawasaki :

$$a_1 - a_2 + a_3 - a_4 + \dots - a_{2n} = 0.$$

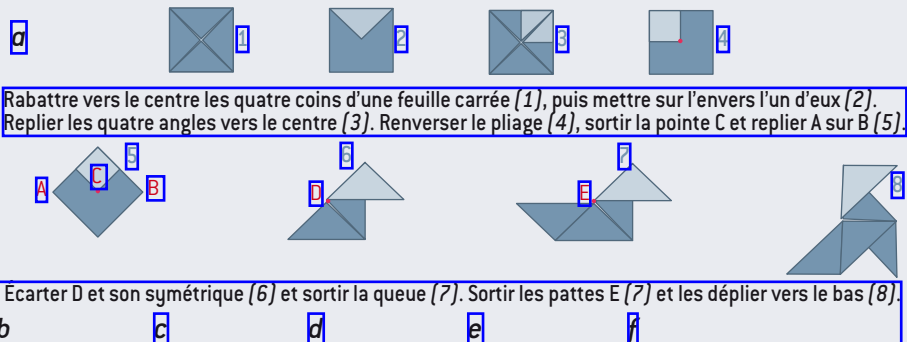
Puisque $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + \dots + a_{2n} = 360^\circ$, la somme des angles de numéro pair et la somme des angles de numéro impair valent chacune 180° . Pour la cocotte en papier, les angles du sommet où se rejoignent quatre arcs rouges et deux bleus sont $a_1 = 90^\circ$, $a_2 = 90^\circ$, $a_3 = 45^\circ$, $a_4 = 45^\circ$, $a_5 = 45^\circ$, $a_6 = 45^\circ$ et on a :

$$\begin{aligned} a_1 - a_2 + a_3 - a_4 + a_5 - a_6 &= 0, \\ a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 &= 360^\circ, \\ a_1 + a_3 + a_5 &= a_2 + a_4 + a_6 = 180^\circ. \end{aligned}$$

La condition $a_1 - a_2 + \dots - a_{2n} = 0$ sur les angles autour d'un nœud du graphe est nécessaire et suffisante pour qu'il existe une façon de plier localement à plat la feuille. Autrement dit, si cette condition est vérifiée, il existe une façon de choisir pour chaque pli dessiné s'il est montagne ou vallée et qui permet le pliage à plat. Une question se pose alors : si un dessin de plis (ne précisant pas les plis vallée et montagne) est donné, tel que chaque nœud du graphe vérifie la condition du théorème de Kawasaki (donc chaque nœud est localement pliable à plat), peut-on le plier globalement à plat ? La réponse

est en temps linéaire (en fonction du nombre d'arcs du graphe) et qui trouve une telle assignation s'il y en a, ou conclut qu'il n'en existe pas.

Puisque trouver une telle assignation ne garantit pas que le pliage est faisable, une question se pose : disposant d'une assignation correcte (c'est-à-dire satisfaisant les trois propriétés) peut-on rapidement savoir si la feuille est pliable globalement à plat selon les plis de l'assignation ? Cette fois, la réponse est non, car ce problème est NP-complet : on ne connaît aucun algorithme capable de le



Tout canevas d'origami est impossible s'il n'a pas les trois propriétés, mais tout canevas qui les a ne rend pas possible un pliage selon les plis du canevas (et eux seuls). En effet, en voulant réaliser les pliages dessinés, on rencontre parfois une situation où il faudrait forcer la feuille à se traverser elle-même. Une telle situation est illustrée en d : les trois propriétés sont satisfaites, mais le pliage à plat de l'ensemble est impossible (essayez !).

est non. Un exemple (proposé par Thomas Hull en 1994) d'une telle situation où les pliages à plat sont possibles localement, mais incompatibles globalement, est donné en e. Savoir si, pour un graphe donné sur une feuille, il est possible ou non de choisir montagne ou vallée pour chaque pli de façon à satisfaire les trois conditions est algorithmiquement facile : Marshall Bern et Barry Hayes ont décrit un algorithme qui fonctionne en

temps polynomial. Le canevas représenté en f est dû au grand origamiste Robert Lang (les plis montagne sont tracés en noir et les plis vallée en pointillé bleu). Les propriétés 1-3 sont satisfaites à chaque nœud interne de la feuille. Pour un bon origamiste, la connaissance du canevas et d'une image de l'objectif à atteindre suffit : il devinera comment et dans quel ordre opérer les plis pour arriver à la sculpture en papier.

Les axiomes de Justin-Huzita-Hatori

Les constructions de plis et de points par intersection de plis faisables lorsqu'on manipule une feuille de papier (supposée plane) sont décrites par une série de sept axiomes découverts par Jacques Justin, Humaki Huzita et Koshiro Hatori.

Axiome 1. Étant donnés deux points p_1 et p_2 , il existe un pli unique passant par eux.

Axiome 2. Étant donnés deux points p_1 et p_2 , il existe un pli unique amenant p_1 sur p_2 .

Axiome 3. Étant données deux droites d_1 et d_2 , il existe un pli qui amène d_1 sur d_2 .

Axiome 4. Étant donné un point p et une droite d , il existe un pli unique perpendiculaire à d qui passe par p .

Axiome 5. Étant donnés deux points p_1, p_2 et une droite d , il existe un pli qui place p_1 sur d et qui passe par p_2 .

Axiome 6. Étant donnés deux points p_1, p_2 et deux droites d_1, d_2 , il existe un pli qui place p_1 sur d_1 et p_2 sur d_2 .

Axiome 7. Étant donné un point p et deux droites d_1 et d_2 , il existe un pli qui place p sur d_1 et qui est perpendiculaire à d_2 .

Ces axiomes n'envisagent qu'un seul pli à la

fois. La possibilité de faire plusieurs plis à la fois a été étudiée et on a montré qu'elle enrichit le répertoire des possibilités.

Si l'on a au départ deux points supposés distants d'une unité, et qu'on considère tous les points que peuvent faire apparaître les pliages successifs de la feuille sur laquelle ils sont donnés, ce qui revient à appliquer les axiomes 1-7, les coordonnées des points résultants constituent l'ensemble des nombres constructibles par origami, que l'on notera OR. L'idée de la définition est analogue à celle de l'ensemble des nombres constructibles à la règle et au compas défini à partir de deux points distants d'une unité. Cet ensemble des nombres constructibles à la règle et au compas sera noté RC.

Un cercle étant donné sur un plan, peut-on dessiner à

la règle et au compas un carré dont l'aire soit la même que celle du disque délimité par le cercle? Ce problème dit de la quadrature du cercle équivaut à déterminer si le nombre π est dans RC. Grâce aux travaux de Ferdinand Lindemann, on sait depuis 1882 que la réponse est négative: aucune construction à la règle et au compas ne permettra, partant de deux points distants d'une unité, d'en construire deux distants de π unités. La théorie des constructions à la règle et au compas montre aussi que la racine cubique de 2 n'est pas dans RC, et la trisection d'un angle quelconque est impossible à la règle et au compas.

L'ensemble OR est plus grand que RC. Le nombre π n'est pas dans OR et la quadrature du cercle reste impossible par origami, mais la racine cubique de 2 l'est. L'antique problème de la duplication du cube, impossible à la règle et au compas, est donc soluble par origami. On peut aussi trisecter un angle par origami (voir l'encadré suivant).

vraiment se plier à plat est NP-complet (c'est-à-dire algorithmiquement difficile).

Quand on opère des plis, par exemple pour amener l'un sur l'autre deux plis déjà marqués sur la feuille, on réalise l'équivalent d'une construction géométrique sur la feuille. La trace de l'ensemble des plis sera observée en remettant la feuille à plat. Ces constructions géométriques par pliage qu'on imagine réaliser avec une précision parfaite (plis infiniment fins et rectilignes, alignements exacts, etc.), sont analogues aux constructions que les Grecs faisaient avec une règle et un compas, et qui les ont conduits à énoncer le célèbre problème de la quadrature du cercle, attribué à Anaxagore vers - 430 : construire π à la règle et au compas (voir l'encadré ci-contre).

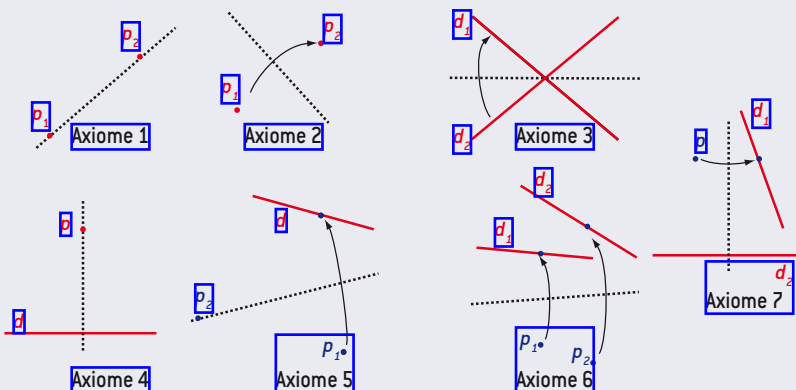
Sept types de plis pris comme axiomes

Les mathématiciens origamistes se sont donc demandé si les pliages autorisent plus de constructions, moins de constructions ou exactement les mêmes constructions que la règle et le compas des Grecs. La réponse, subtile, est d'une remarquable précision.

Elle nécessite d'abord de déterminer explicitement les opérations de pliage qu'on s'autorise et de les classer. Quand on opère un seul pli à la fois, il y a sept plis possibles, donc sept constructions possibles d'un nouveau pli à partir de plis ou de points déjà présents sur la feuille. Ces sept opérations de base définissent les sept axiomes de base de l'origami, les « axiomes de Justin-Huzita-Hatori ».

Si l'on s'impose de n'utiliser que les quatre premiers axiomes, on parle d'origami pythagoricien; le pouvoir de construction géométrique obtenu est celui de la règle et du compas à pointe sèche (qui permet de reporter des longueurs, mais pas de dessiner des cercles).

Ce pouvoir de construction définit les « nombres pythagoriciens » qui sont les nombres pouvant intervenir dans les coordonnées d'un point résultant d'une construction au moyen des quatre axiomes (ou à



la règle et au compas à pointe sèche). Sur le plan algébrique, les nombres pythagoriciens s'obtiennent en partant des entiers et en opérant successivement, autant de fois qu'on le veut, des additions, des soustractions, des multiplications, des divisions et l'opération qui à a et b associe la racine carrée de $a^2 + b^2$. Ainsi, $\sqrt{2}$ est un nombre pythagorien puisque $2 = 1^2 + 1^2$, et il en est de même, par exemple, du nombre :

$$\frac{\sqrt{9 + (1 + \sqrt{2})^2}}{11 / \sqrt{2}}$$

Les racines carrées de nombres entiers (tel 3) qui ne sont pas sommes de deux carrés d'entiers ne sont pas des nombres pythagoriciens. Le nombre π et la racine

cubique de 2 ne sont pas pythagoriciens non plus.

Ce pouvoir de construction des plis des quatre premiers axiomes est inférieur à celui de la règle et du compas. Pour obtenir ce pouvoir de construction (ni plus, ni moins), il faut ajouter le cinquième type de plis, défini par l'axiome 5.

Construire les nombres euclidiens par origami

Les nombres obtenus sont qualifiés d'euclidiens : ce sont tous les nombres qu'on obtient à partir des entiers en effectuant des additions, des soustractions, des multiplications, des divisions et des extractions

de racine carrée. Par exemple, le nombre suivant est euclidien :

$$\frac{\sqrt{\sqrt{2}/(4 + \sqrt{11})}}{\sqrt{\sqrt{2} + 2\sqrt{21}}}$$

On sait que le nombre π n'est pas euclidien et c'est pourquoi le problème de la quadrature du cercle n'a pas de solution quand on s'impose de n'utiliser que la règle et le compas. Il n'en aura pas non plus avec les constructions par pliage avec les cinq premiers types de plis et même avec les sept. La racine cubique de 2 n'est pas non plus un nombre euclidien et c'est pourquoi l'antique problème de la duplication du cube (partant d'un cube donné, construire à la règle et au

Théorème de Haga, duplication du cube, trisection d'un angle

Les nombres rationnels

Le théorème de Kazuo Haga indique un moyen de construire rapidement par pliage tout nombre rationnel (quotient de deux entiers).

On part (figure I) d'une feuille carrée de côté 1, où est marqué un point P sur le bord en haut du carré. Ce point P a été obtenu par des opérations de plis précédentes. On effectue le pli qui amène le coin en bas à gauche sur P. Posons $x = AP$. Un petit raisonnement montre que $y = BQ = 2x/(1+x)$. Si l'on prend $x = 1/2$, on obtient $y = 2/3$, d'où

l'on déduit $1/3$. Par ce procédé, de proche en proche, on obtient toutes les fractions que l'on veut. Le tableau ci-contre constitue une aide.

Racine cubique de 2

Le pliage de Peter Messer permet de « calculer » la racine cubique de 2 (impossible à obtenir à la règle et au compas).

On fait glisser le point P (le coin gauche en bas de la feuille carrée) sur le bord de la feuille en haut (figure II). On le place au départ en haut à gauche, puis on le fait aller vers la droite

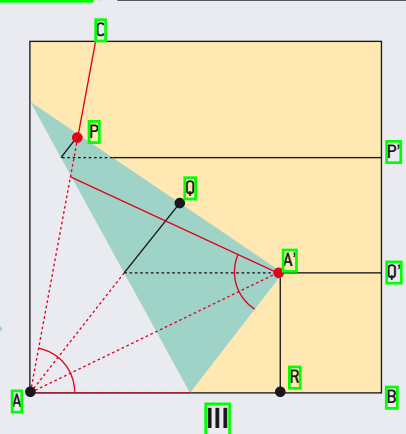
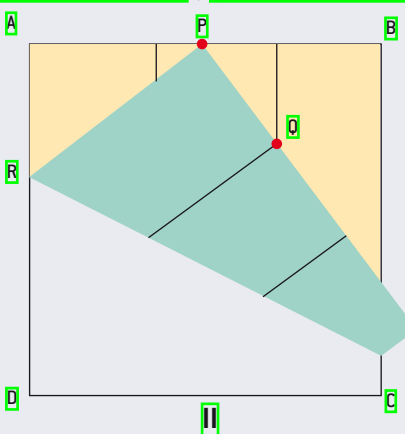
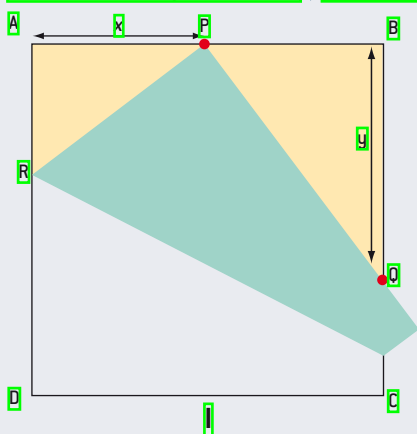
jusqu'à ce que le point Q (le bas de la ligne verticale à $1/3$ de distance du bord gauche de la feuille) rejoigne la ligne verticale à $2/3$ de distance du bord gauche de la feuille. Quand cela se produit, on a la position définitive de P et PB/PA est égal à la racine cubique de 2.

Trisection d'un angle

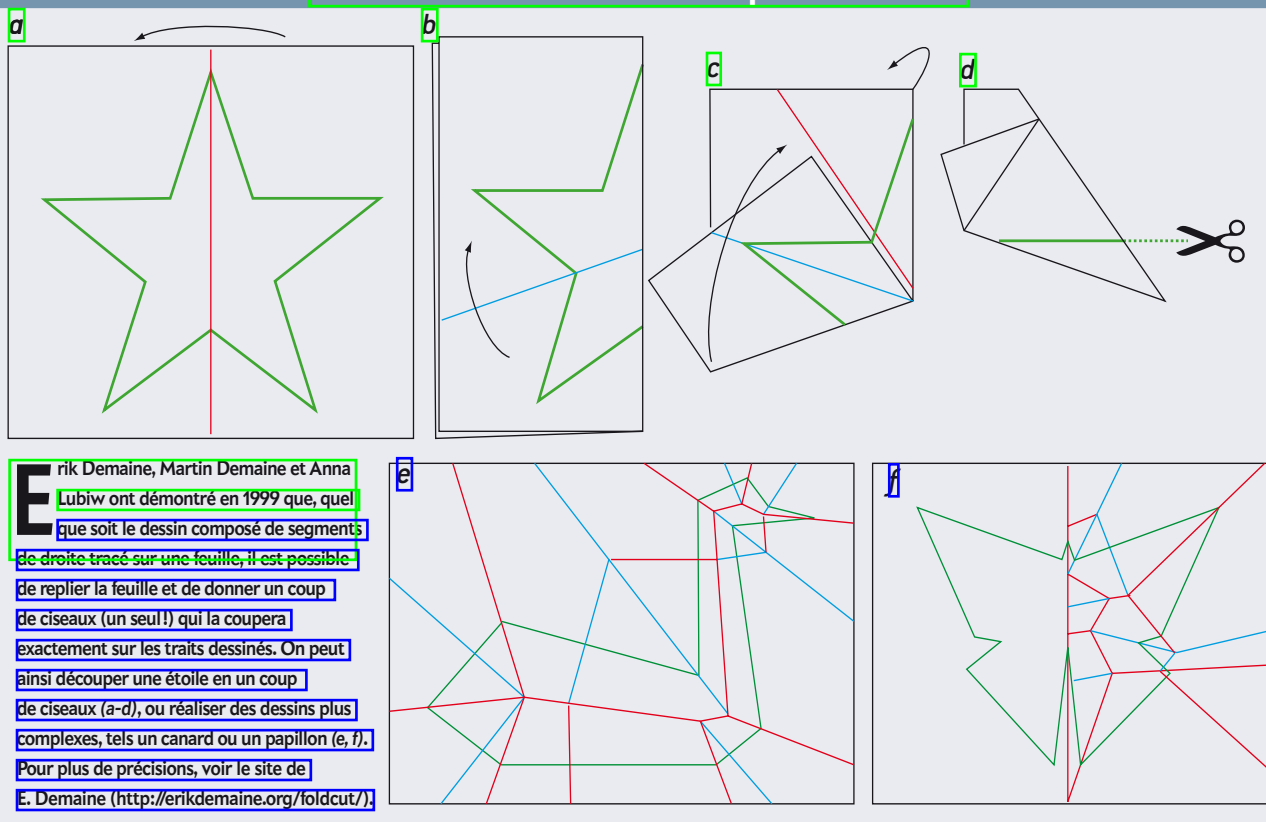
Voici la construction par origami de la trisection d'un angle CAB, due à Hisashi Abe (figure III). On fait deux plis horizontaux PP' et QQ' de façon que QQ' soit au milieu entre PP'

et le bord inférieur du carré de papier. Puis on amène P sur le segment AC, en même temps que le point A est amené sur le pli QQ' . L'angle A'AB est le tiers de l'angle CAB (car les trois angles PAQ, QAA', A'AB sont égaux).

AP	BQ	QC	AR	PQ
x	$2x/(1+x)$	$(1-x)/(1+x)$	$(1-x^2)/2$	$(1+x^2)/(1+x)$
1/2	2/3	1/3	3/8	5/6
1/3	1/2	1/2	4/9	5/6
2/3	4/5	1/5	5/18	13/15
1/5	1/3	2/3	12/25	13/15



Tout faire en un seul coup de ciseaux



compas un cube dont le volume soit double] n'a pas de solution.

Les cinq premiers axiomes de l'origami conférant le pouvoir de construction de la règle et du compas, l'ajout des axiomes 6 et 7 du pliage offre-t-il le moyen de le dépasser ? La réponse est oui. L'ensemble des « nombres constructibles par origami » [avec les sept types de plis] est plus grand que l'ensemble des nombres euclidiens. Du point de vue du mathématicien, cet ensemble de nombres s'obtient à partir des entiers en opérant des additions, des soustractions, des multiplications, des divisions, des extractions de racine carrée et des extractions de racine cubique. Un exemple de nombre constructible par origami, mais qui ne l'est pas à la règle et au compas, est ainsi :

$$\frac{\sqrt{\sqrt{2} + 2\sqrt[3]{21}}}{\sqrt[3]{\sqrt{2}/(4 + \sqrt{2})}}$$

Cette fois, la duplication du cube est possible, de même d'ailleurs que la trisection de l'angle, qui ne l'est ni avec les cinq premiers axiomes, ni à la règle et au compas. L'étude de l'axiome 7 montre qu'il est superflu, car les constructions qu'il permet sont les mêmes que celles obtenues avec les six premiers. Ces nombres constructibles par origami contiennent tous les nombres solution d'une équation polynomiale de degré 1, 2, 3, ou 4. Des procédés pratiques de pliage ont été décrits pour résoudre par pliages les équations quelconques de degré 3. Ce pouvoir de construction de l'origami est celui dont aurait disposé un géomètre grec muni d'une règle et d'un compas et capable de tracer exactement toute conique (ellipses, paraboles, hyperboles).

Même avec les sept plis, on ne réussira pas la quadrature du cercle, et beaucoup de nombres algébriques (solutions d'équations polynomiales à coefficients entiers),

tels que la racine cinquième de 2, sont aussi hors de portée.

Cependant, si l'on envisage des plis multiples – plusieurs plis sont ajustés simultanément pour obtenir une certaine construction –, on obtient avec l'origami un pouvoir de construction encore supérieur, dont on ignore aujourd'hui jusqu'où il va exactement.

Plis multiples pour nombres algébriques

Robert Lang a par exemple montré que la quintisection [division d'un angle donné en cinq angles égaux] d'un angle quelconque est impossible en utilisant les sept axiomes de base de l'origami, mais qu'en acceptant un double pliage, elle devient possible. L'étude de ces nouveaux plis risque d'être difficile, et l'ordinateur sera indispensable. C'est grâce à lui que Roger Alperin et R. Lang ont calculé que le nombre

d'axiomes à envisager pour les doubles plis est 489. Ces deux chercheurs ont aussi établi qu'en autorisant $(n - 2)$ plis simultanés, il devient possible de résoudre n'importe quelle équation polynomiale à coefficients entiers de degré n . Cela établit que le pouvoir théorique de construction de l'origami, conçu sous sa forme la plus générale avec des plis multiples, donne tous les nombres algébriques, ce qui était inespéré.

Le théorème de la découpe unique

Dans un de ses tours, le célèbre prestidigitateur américain Harry Houdini effectuait le pliage d'une feuille de papier, donnait un coup de ciseaux et déplaçait la feuille, qui montrait alors un trou parfait en forme d'étoile à cinq branches. Le pliage qui le permet n'est pas très compliqué, mais il suggère une question que Martin Gardner posa dans un article il y a plus de 20 ans : en opérant ainsi – des pliages, puis un coup de ciseaux –, quelles formes peut-on obtenir ? La réponse est étonnante : tout dessin composé de traits rectilignes, par exemple en forme de canard ou de papillon (voir l'encadré page ci-contre).

Ce magnifique résultat de la découpe unique (*fold-and-cut theorem*) est dû aux Canadiens Erik Demaine, Martin Demaine (le père du premier) et Anna Lubiw. Il a été démontré en 1999, et la démonstration constructive décrit un algorithme qui fournit les pliages à effectuer. Depuis, divers compléments ont été apportés à cette première démonstration, conduisant à deux méthodes différentes pour savoir quel pliage faire et quel coup de ciseaux donner quand on s'est fixé le motif à obtenir.

Parmi les problèmes de pliages les plus simples, il y a celui de savoir combien de fois on peut replier une feuille de papier (ou de tissu) sur elle-même en deux par le milieu. Le problème admet deux versions : soit on autorise des pliages selon une seule direction et on partira alors de préférence d'une feuille très allongée, soit on s'autorise à plier la feuille en deux selon deux axes perpendiculaires.

Il se racontait, sans qu'on sache bien d'où venait l'affirmation, que huit était le maximum possible pour ce nombre de pliages successifs en deux. Une jeune Américaine, Britney Gallivan, s'est prise de passion pour le problème. Elle a réussi à la fois à proposer une formule mathématique intéressante aidant à comprendre le problème et à pousser le record de pliage bien au-delà de tout ce qu'on imaginait possible. Après avoir plié une feuille d'or 12 fois en deux sur elle-même selon deux directions, la jeune fille encore élève au collège se procura un rouleau de papier toilette de 1 200 mètres de long et put le replier en deux sur lui-même 12 fois de suite dans une même direction.

B. Gallivan a étudié soigneusement le problème physico-géométrique de ce type de pliages. Contrairement à ce qu'on serait tenté de penser, pour augmenter le record d'une unité avec une bande d'épaisseur fixée, il ne faut pas une bande deux fois plus longue, mais une bande environ quatre fois plus longue. En effet, quand on plie la bande déjà pliée, une partie notable de la bande sert à joindre les parties horizontales.

Pliages limités par l'épaisseur du papier

La formule démontrée par B. Gallivan pour la longueur L perdue dans ces morceaux servant à raccorder les parties horizontales du pliage est :

$$L = e \pi [2^n + 4] [2^n - 1] / 6,$$

où e est l'épaisseur du papier et n le nombre de pliages effectués. On voit que L est à peu près quadruplée quand n augmente d'une unité.

Bien d'autres aspects du pliage sont aujourd'hui à l'étude. On découvre que derrière ces problèmes géométriques d'apparence simple se cachent des mathématiques merveilleuses concernant bien sûr la géométrie, mais aussi la théorie des nombres, l'algèbre, l'algorithmique et la théorie de la complexité. On est loin d'avoir fait le tour du sujet, qui prend une ampleur étonnante : les actes du congrès de 2011 sur l'origami, organisé par l'Université de Singapour, réunissent une cinquantaine de communications occupant 654 pages !

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'Université de Lille et chercheur

au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

R. Lang, *Origami Design Secrets, Mathematical Methods for an Ancient Art*, CRC Press (2^e édition), 2012.

J. O'Rourke, *How to Fold it, The Mathematics of Linkage, Origami and Polyhedra*, Cambridge University Press, 2011.

E. Demaine et J. O'Rourke, *Geometric Folding Algorithms*, Cambridge University Press, 2007.

R. Alperin et R. Lang, *One-, two, and multi-fold origami axioms*, *Origami*, vol. 4, pp. 371-393, 2006.

Références supplémentaires sur le site www.pourlascience.fr



Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Yoda, un amphibien d'une galaxie lointaine est-il ?

Figure emblématique de la saga Star Wars, Yoda incarne la sagesse et le côté lumineux de la Force. Ses origines restent néanmoins obscures. À quelle espèce pourrait-il appartenir ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Les producteurs de l'épisode VII de *Star Wars* (dont la sortie est prévue pour décembre 2015) ont annoncé son titre officiel, qui sera « Le réveil de la Force » (*The Force Awakens*). Les fans sont d'autant plus ravis qu'ils retrouveront Harrison Ford dans le rôle de Han Solo, mais aussi R2D2 et Chewbacca. En revanche, le mystère demeure sur Maître Yoda, pourtant l'un des personnages les plus adulés de la saga.

Les producteurs entretiennent le mythe de ce petit personnage dont on ne connaît ni l'origine ni la véritable identité, contrairement aux autres héros qui sont assez fouillés. Même dans l'univers étendu ou sur les sites spécialisés – tels que la *Star Wars Databank* –, Yoda est répertorié avec la mention « espèce inconnue ». Menons l'enquête. En comparant sa morphologie à celle des animaux terrestres, essayons de deviner à quelle espèce Yoda pourrait appartenir.

Que sait-on de lui ? Haut comme trois pommes, vert de peau et d'un âge avancé, Yoda est un concentré de Force et de sagesse qui en fait l'un des personnages les plus importants de l'univers *Star Wars*. Empathique, clairvoyant et à la syntaxe originale (toujours en dernier le verbe il met), il combat le côté obscur de la Force. Yoda apparaît pour la première fois à l'écran en 1980 dans *L'Empire contre-attaque* (Épisode V). Il vit alors reclus sur la planète Dagobah jusqu'à l'arrivée de Luke Skywalker qui vient parfaire son apprentissage de Jedi à ses côtés.

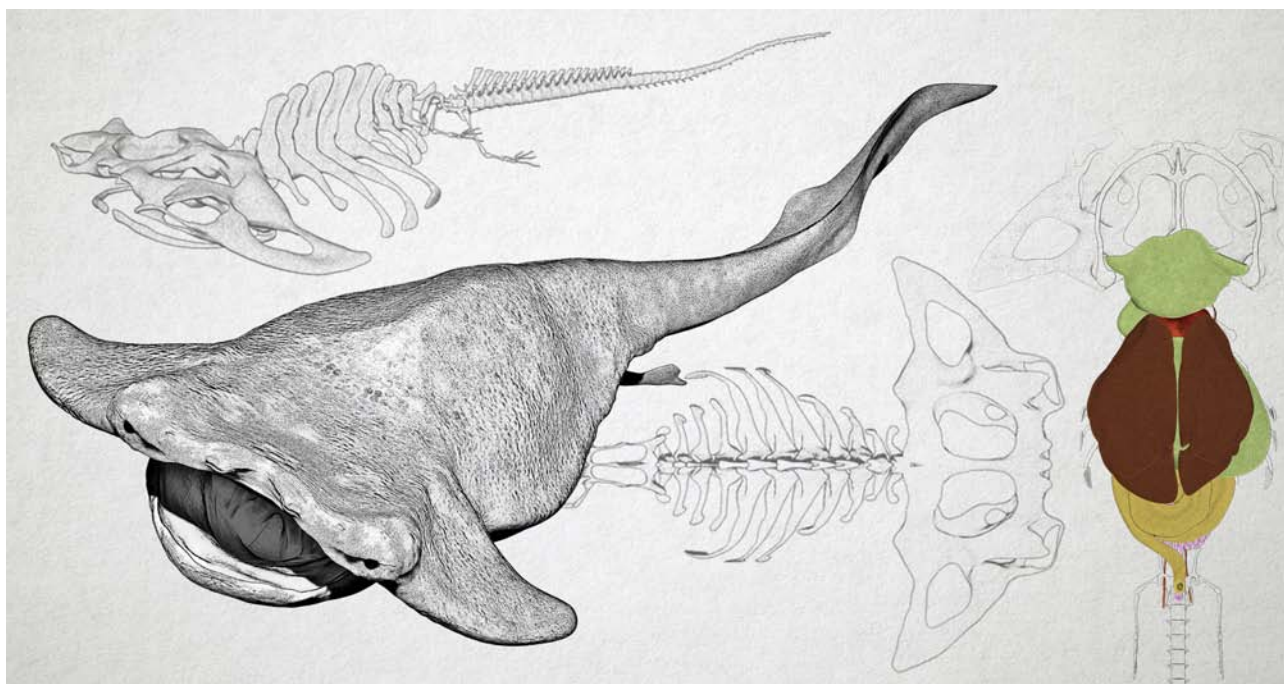


LA NATURE DE YODA, un des héros de la saga *Star Wars*, reste un mystère. D'après ses concepteurs, les yeux sont inspirés du regard d'Albert Einstein, mais d'autres indices pointent vers les caractères d'un amphibien.

Avant l'ère du numérique, Yoda était une marionnette complexe et articulée conçue par le talentueux sculpteur Stuart Freeborn. Le père de Yoda peut-il nous renseigner sur l'identité de sa créature ? Dans une interview de l'époque, il avoue s'être inspiré d'Albert Einstein pour les yeux...

Certes, le regard vif et profond du Jedi peut évoquer celui du physicien, mais ses grands yeux à moitié fermés, son menton poilu et son front dégarni rappellent plutôt ceux d'un vieux maître en art martial. D'ailleurs, certains voient dans le terme « Yoda » un dérivé de yoga ; d'autres se tournent vers le sanscrit, *yoda* signifiant « guerrier », ou encore vers l'hébreu *yodea*, « celui qui sait ». Dans le même entretien, le marionnettiste Frank Oz, qui tirait les ficelles et animait Yoda, précise : « Je pouvais voir [en lui] de la patience, de l'intelligence, de la sagesse et de la force. J'étais simplement la personne qui mélangeait tous ces ingrédients dans un être crédible et chaleureux. »

Les artistes à l'origine du personnage nous en apprennent peu sur son identité... Tournons-nous plutôt vers son anatomie : ce « petit homme vert » d'une soixantaine de centimètres de haut, modestement vêtu, présente des jambes et des bras robustes terminés par des doigts boudinés et griffus. Sa tête volumineuse, légèrement allongée vers l'arrière, arbore de grandes oreilles pointues et latéralisées, des yeux brun clair avec des paupières, un nez et des narines externes discrètes, ainsi qu'une petite



ET SI YODA ÉTAIT APPARENTÉ À BENTHOGYRINUS, un amphibien géant et imaginaire, présenté ici sous forme de planche anatomique ?

bouche munie de dents. Yoda possède donc tous les caractères (anthropomorphisés, certes !) du tétrapode, c'est-à-dire du vertébré muni de membres chiridiens (en l'occurrence des doigts).

Sur Terre, les tétrapodes regroupent les amphibiens, les reptiles (oiseaux inclus) et les mammifères, soit 30 000 espèces environ. Aquatiques, amphibies, terrestres ou volants, ils occupent des écosystèmes variés. L'habitat de Yoda peut-il nous renseigner sur son identité ? À défaut de connaître son monde d'origine, penchons-nous sur Dagobah, sa planète d'adoption : c'est une planète tellurique dont l'atmosphère est assez riche en dioxygène pour que Luke Skywalker puisse respirer et dont la pression et la température permettent à l'eau d'y être présente à l'état liquide. Dagobah est recouverte de marécages brumeux. Les formes de vie les plus visibles sont végétales, sans doute des plantes dont la structuration semble assez complexe. Yoda paraît bien adapté au climat chaud et humide de Dagobah ainsi qu'à son écosystème marécageux.

Sur Terre, les tétrapodes adaptés à de tels environnements d'eau douce et de climat tropical sont notamment les amphibiens, représentés aujourd'hui par les anoures (grenouilles, crapauds), les urodèles (salamandres, tritons) et, plus discrets, les gymnophiones (ou « apodes » car ils ont perdu leurs pattes), soit environ

5 500 espèces. La plupart des amphibiens adultes sont munis de poumons, mais respirent aussi grâce à leur peau lisse et visqueuse. Yoda a des poumons (il a des narines et une cage thoracique), mais il ne semble pas respirer par la peau, sinon il ne serait que rarement vêtu !

Le Maître Jedi serait-il un amphibien ? Le fait qu'il porte des griffes n'est pas incompatible avec cette idée : de nombreux amphibiens actuels, tels le crapaud *Xenopus laevis* ou la grenouille *Astylosternus perreti*, sont munis de griffes qui leur permettent de creuser, de se défendre ou de saisir la femelle pendant l'accouplement. Les griffes d'*Astylosternus perreti* sont même rétractiles et constituées d'os pointus qui sortent en transperçant parfois la peau, un peu comme chez Wolverine dans *X-men*.

Des doigts de grenouille

Le nombre de doigts de Yoda pourrait nous aider à l'identifier. Le nombre d'orteils varie selon les films (trois dans l'*Épisode I*, quatre dans les autres), mais le Jedi a toujours trois doigts aux membres antérieurs, comme les oiseaux, les rhinocéros ou encore le cheval (qui, même s'il se déplace sur un gros doigt, en a deux autres sur les côtés, très régressés). Signalons que les rhinocéros et chevaux sont des mammifères périssodactyles, c'est-à-dire caractérisés par un nombre impair de doigts à l'arrière terminés par des

sabots. Yoda présente-t-il des sabots ? Non. Des ailes ? Non plus. Notons que certains dinosaures, proches justement des oiseaux, présentaient eux aussi trois doigts à l'avant. C'est le cas d'*Allosaurus fragilis*, théropode du Jurassique, mais aussi de certains amphibiens, encore eux ! *Brachycephalus tridactylus*, comme son nom l'indique, est une petite grenouille du Brésil dont chacune des quatre pattes est dotée de trois doigts.

Yoda serait donc un amphibien. Il devrait alors pondre et se reproduire dans l'eau. George Lucas, producteur des deux premières trilogies *Star Wars*, est hélas resté très pudique sur la sexualité du vieux sage. Dans *La Menace Fantôme* (Épisode I), où de nombreuses espèces extraterrestres sont présentes au Sénat galactique (avec un clin d'œil à E. T. de Spielberg), on distingue tout de même Yaddle qui n'est autre qu'une Yoda version femelle. Nous en déduisons donc que l'espèce se propage bien par reproduction sexuée.

Amphibien ou pas, espérons que le prochain opus nous éclairera sur ce sujet. En attendant, dans le documentaire *From Puppets to Pixels*, George Lucas, grand fan du *Muppet Show*, donne peut-être la solution sur l'origine de Yoda : « c'est une grenouille, le fils illégitime de Peggy la cochonne et de Kermit » ! ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

ART & SCIENCE

Dans la tête d'un requin-marteau

Grâce à des casques-sculptures, deux artistes irlandais proposent d'adopter la vision du monde d'un requin-marteau, d'un caméléon, d'une girafe... ou encore d'Alice regardant le chat du Cheshire, dont seuls les yeux et la bouche restent visibles.

Loïc MANGIN

Quel effet cela fait-il d'être une chauve-souris ? Cette interrogation est le titre d'un article du philosophe américain Thomas Nagel paru en 1974. Il dénonce les hypothèses dominantes à l'époque selon lesquelles les états mentaux ne relèveraient que de processus neurobiologiques. Selon Th. Nagel, ces théories négligent l'expérience phénoménale, c'est-à-dire ce que l'on ressent quand on perçoit quelque chose. Cette expérience prend en compte les stimulus sensoriels, mais aussi les sensations corporelles (faim, fatigue...), les émotions, les sentiments, etc.

Ces idées sont à rapprocher du concept de *Umwelt*, ou « monde propre », développé au début du XX^e siècle par le biologiste allemand Jacob von Uexküll : chaque espèce est dotée d'un environnement sensoriel caractéristique, une sorte d'expérience personnelle de ce qui l'entoure. En fin de compte, Th. Nagel affirme que le seul moyen de savoir ce que c'est d'être une chauve-souris serait d'être soi-même... une chauve-souris.

Eh bien soit ! C'est probablement ce que se sont dit Anne Cleary et Denis Connolly, artistes en résidence au Centre culturel irlandais, à Paris. Dans le cadre de leur exposition *The Meta-perception Club*, ils présentent une série de sculptures interactives – des casques – qui offrent aux visiteurs la possibilité d'explorer les mystères de la perception visuelle en se mettant dans la tête de diverses espèces : un cheval, une girafe, un caméléon, un requin-

marteau et même d'Alice, le personnage de Lewis Carroll, face au chat du Cheshire, qui a l'habitude de disparaître partiellement !

L'idée leur a été inspirée par une expérience de l'Américain George Stratton, un pionnier de la psychologie expérimentale et de l'étude de la vision. Au début du XX^e siècle, il porta pendant plusieurs jours des lunettes qui inversaient le haut et le bas ainsi que la droite et la gauche. Au début déboussolé, il s'adapta en une semaine à cette nouvelle façon de voir et affirma même que son cerveau avait rétabli son environnement dans le sens original. Cette dernière assertion a été

Le seul moyen de savoir ce que c'est d'être une chauve-souris serait d'être soi-même... une chauve-souris.

contestée, par exemple par David Linden et ses collègues de l'Institut Max Planck pour les neurosciences, à Francfort, en Allemagne.

Toutefois, ces expériences montraient que la vision est une porte d'entrée pour explorer, au moins de façon partielle, le *Umwelt* de l'être humain. Pouvaient-ils faire de même avec d'autres espèces animales ? C'est ce à quoi se sont attelés A. Cleary et D. Connolly, avec l'aide de Patrick Cavanagh, du Laboratoire Psychologie de la perception, à l'Université Paris Descartes. Pour ce faire, ils ont construit des casques équipés d'un dispositif optique (des lentilles, des miroirs, des tubes...) qui offrent à celui

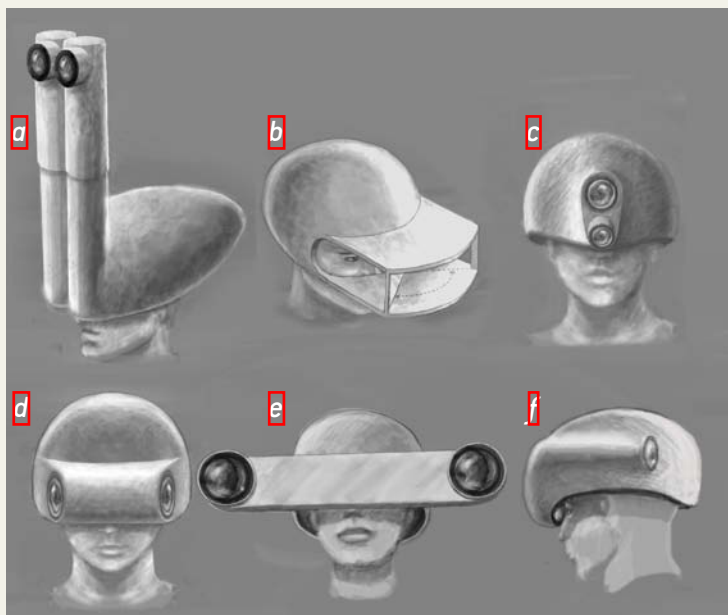
qui les coiffe une nouvelle vue sur le monde (voir page ci-contre). Ainsi, pour un requin-marteau, les « yeux » sont très espacés ; pour un cheval, les champs de vision, latéraux, ne se recouvrent quasiment pas ; pour un caméléon, ils s'ouvrent dans des directions opposées ; pour une girafe, ils sont haut perchés.

Le casque du chat du Cheshire, inspiré des travaux de Sally Duensing, en 1978, au Musée de l'Exploratorium, à San Francisco, est plus complexe. En le portant face à un individu, vous voyez, d'une part, son visage et, d'autre part, votre main lorsque vous l'agitez sur le côté. Votre cerveau mêle les deux images, ce qui se traduit souvent par l'effacement de votre vis-à-vis, à l'exception... de ses yeux et de sa bouche.

Les objets conçus par les deux artistes ont été élaborés comme des sculptures. De belle facture, ils ont été façonnés à la main en aluminium par Niall McKenzie, un carrossier installé sur l'île de Jersey. Ils sont à la disposition des visiteurs, les créateurs tenant à la participation du public – une constante dans leur œuvre. Allez donc bousculer votre *Umwelt* !

Selon Oscar Wilde, un autre Irlandais : « La beauté (d'une œuvre d'art par exemple) se situe dans l'œil de celui qui regarde. » Les casques vont encore plus loin, car cette fois, l'œuvre devient l'œil de celui qui regarde. ■

The Meta-perception club, du 6 janvier au 20 février 2015, au Centre culturel irlandais, 5 rue des Irlandais, 75005 Paris. <http://www.centreculturelirlandais.com>



CES CASQUES AIDENT À SE METTRE DANS LA PEAU d'une girafe (a), d'Alice face au chat du Cheshire (b), d'un cyclope (c, celui-ci n'a pas été construit), d'un cheval (d), d'un requin-marteau (e), d'un caméléon (f)...



A QUOI RESSEMBLERAIT PARIS vu par un hypothétique requin-marteau installé en haut de la butte Montmartre ?



PHOTO: C. CHEN / 3. J. V. CHEN / 3.

LE CASQUE DU CHAT DU CHESHIRE, du nom du personnage de Lewis Carroll, ne laisse apparaître que les yeux et la bouche d'un individu situé en face de vous.

IDÉES DE PHYSIQUE

Refroidir avec des aimants

Certains matériaux s'échauffent quand on les plonge dans un champ magnétique. Des réfrigérateurs de nouvelle génération utilisent cet effet magnétocalorique.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Le temps des réfrigérateurs fonctionnant avec des compresseurs, des hautes pressions et des gaz nocifs à la couche d'ozone est-il révolu ? La société alsacienne Cooltech est la première au monde à industrialiser et à commercialiser une alternative crédible à ces dispositifs classiques : un système de réfrigération constitué d'aimants ! Il est fondé sur l'effet magnétocalorique, découvert en 1881 sur le fer par le physicien allemand Emil Warburg. Plongez un matériau magnétique dans un champ magnétique et il s'échauffera légèrement ; retirez-le et il se refroidira. Nous donnerons plus loin une explication de ce phénomène. Commençons par le plus facile : comment, à partir de ces variations de température, réaliser un réfrigérateur ?

Un cycle thermique avec un matériau magnétique

Le principe est simple (voir la figure de gauche page 87) et ressemble au cycle suivi par le fluide frigorigène dans un réfrigérateur classique. Lorsqu'on plonge le matériau magnétique à température ambiante dans le champ d'un aimant, il s'échauffe. Au moyen d'un échangeur thermique, on évacue partiellement la chaleur produite. Il suffit alors de retirer le matériau du champ

pour le refroidir à une température inférieure à la température ambiante, puis refroidir l'espace à réfrigérer grâce à un second échangeur thermique.

Comment optimiser le dispositif ? D'abord en réalisant des champs magnétiques puissants, ce qui est possible aujourd'hui avec des aimants au néodyme en U. Le champ qu'ils créent peut atteindre une intensité de un tesla, soit plus de 10 000 fois l'intensité du champ magnétique terrestre.

Vient à présent le choix du matériau magnétocalorique. Dans un réfrigérateur classique, pour plus d'efficacité, le cycle met en jeu l'évaporation et la condensation d'un fluide, c'est-à-dire le passage entre le liquide, une phase ordonnée, et le gaz, une

phase non ordonnée. De façon analogue, pour un réfrigérateur magnétique, on met à profit la transition entre un état magnétique ordonné, où les aimants élémentaires – ou spins – du matériau sont alignés, et un état non ordonné, où les orientations des spins sont quelconques.

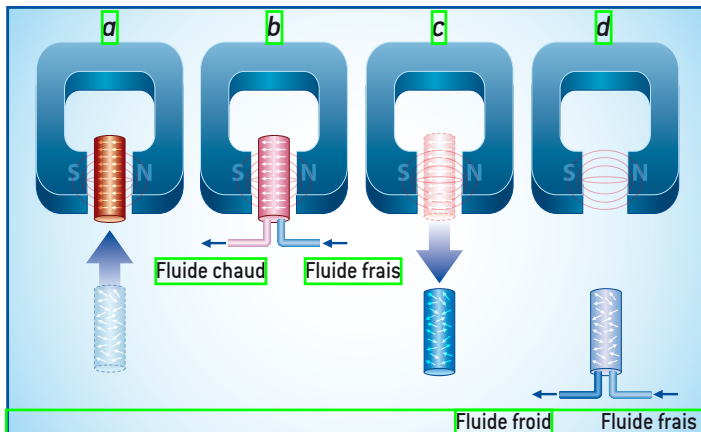
Cette transition se produit à une température nommée température de Curie. Le fer, par exemple, perd son aimantation (état magnétique ordonné) à 770 °C. Autour de cette température, l'aimantation varie considérablement avec la température et est très sensible au champ magnétique ; les variations d'énergie y sont donc importantes.

Cependant, la température de Curie du fer est trop élevée pour des applications. Le gadolinium, avec une température de Curie de 18 °C, est un bien meilleur candidat. Il a été utilisé dans le prototype de réfrigérateur réalisé par les laboratoires américains Ames en 1997, mais les performances de cet appareil sont demeurées modestes, avec un écart de température de 10 °C pour un champ de 10 teslas.

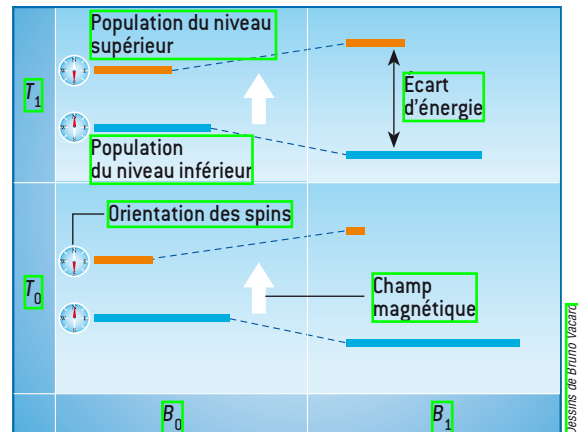
Aujourd'hui, de nouveaux alliages, d'utilisation plus souple et présentant un effet magnétocalorique plus marqué, ont fait leur apparition. Comme l'élévation de température demeure limitée à quelques degrés, il faut envisager des séries de cycles de magnétisation-démagnétisation de ces alliages pour cumuler l'effet et obtenir des différences de température utiles.



DES RÉFRIGÉRATEURS fondés sur l'effet magnétocalorique commencent à être commercialisés, pour des applications encore surtout industrielles (à gauche, le dispositif réfrigérant).



LE CYCLE D'UN RÉFRIGÉRATEUR MAGNÉTIQUE comporte quatre principales étapes. Le matériau magnétique est introduit dans un champ magnétique et s'échauffe *(a)*. Puis la chaleur est en partie évacuée à l'aide d'un fluide froid *(b)*. Le matériau est ensuite retiré du champ, ce qui le refroidit à une température inférieure à celle de départ *(c)*. Il refroidit ainsi un fluide, qui va remplir son rôle réfrigérant *(d)*. Et ainsi de suite. Dans ces transformations, l'ensemble des spins (*petites flèches*) du matériau magnétique passe d'une phase désordonnée (aimantation nulle) à une phase ordonnée (aimantation non nulle), et inversement.



CE SCHÉMA INDIQUE l'énergie des états de spin (*échelle verticale*) et la population, à l'équilibre thermique, de ces états (*échelle horizontale*), pour des valeurs différentes de la température T et du champ magnétique B . Mais si le champ augmente rapidement de B_0 à B_1 , les populations des deux états de spin restent provisoirement inchangées : les spins n'ont pas le temps de se réarranger. L'écart d'énergie ayant augmenté, on se retrouve momentanément dans la situation correspondant à la température supérieure T_1 (et au champ B_1).

Pour ce faire, on monte l'alliage sur un stator tandis que les aimants sont disposés sur un rotor, mis en rotation à des fréquences de quelques hertz. Le réfrigérateur conçu par Cooltech permet ainsi de créer des écarts de température de plus de 40°C , avec une puissance refroidissante qui peut atteindre 700 watts pour une température de conservation de -18°C .

Des spins qui montent en énergie

Venons-en à l'effet magnétocalorique lui-même. Pourquoi un champ magnétique chauffe-t-il un matériau magnétique ? Une analogie avec la compression et la détente d'un gaz donne une première explication intuitive.

Lorsque nous comprimons un gaz, celui-ci s'échauffe, car, en déplaçant les parois pour réduire l'espace disponible, nous lui donnons de l'énergie et augmentons la vitesse d'agitation de ses molécules. Pour un matériau magnétique, « l'agitation » correspond aux rotations rapides des spins (portés par les électrons) qui le composent. Le rôle des parois est joué par le champ magnétique : plus celui-ci est intense, plus le couple qui tend

à aligner les spins dans sa direction est fort. En augmentant ce champ, nous comprimons l'espace angulaire autorisé et augmentons ainsi l'agitation des aimants élémentaires. Cette agitation se transmet au réseau cristallin qui s'échauffe alors. Comme pour un gaz, cet effet est réversible et une réduction du champ magnétique refroidit l'aimant.

Cependant, pour mieux comprendre l'effet magnétocalorique, il faut faire appel à la physique quantique et à la physique statistique. Dans un champ magnétique, l'énergie des spins portés par les électrons est quantifiée ; elle ne peut prendre que deux valeurs, correspondant à un alignement du spin dans le même sens que le champ ou dans le sens opposé.

Que se passe-t-il en l'absence d'agitation thermique ? Après quelques oscillations, l'aiguille d'une boussole pointe dans le sens du champ magnétique. Il en est de même pour les aimants élémentaires d'un matériau : les spins des électrons s'alignent avec le champ, c'est-à-dire qu'ils peuplent le niveau de plus basse énergie.

À température absolue non nulle, il y a de l'agitation thermique et les faibles interactions des spins avec leur environnement et entre eux les déstabilisent. Une

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTAY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris.
Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

BIBLIOGRAPHIE

V. Delecourt, M. Hittinger et C. Muller, **Réfrigération magnétique appliquée au froid**, *Revue générale du froid et du conditionnement d'air*, pp. 50-56, avril 2014.

H. R. El-Hana Bouchekara et M. Nahas, **Magnetic refrigeration technology at room temperature**, dans V. Barsan (éd.), *Trends in Electromagnetism - From Fundamentals to Applications*, InTech, 2012 (<http://dx.doi.org/10.5772/33789>).



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

certaine proportion des spins se retrouvent alors dans le sens opposé au champ, dans l'état de plus haute énergie. Quelle est cette proportion ?

De façon remarquable, la physique statistique montre qu'indépendamment de la nature des interactions, cette proportion ne dépend que de la température absolue T et de l'écart d'énergie ΔE entre les niveaux. C'est la loi de Boltzmann : le logarithme du rapport des populations des deux niveaux est proportionnel au quotient $\Delta E/T$, le niveau inférieur étant le plus peuplé. Dans notre cas, ΔE est proportionnel au champ magnétique. Cela signifie qu'à l'équilibre, lorsqu'on augmente la température à champ constant, ou lorsqu'on diminue le champ à température constante, on peuple l'état de haute énergie (voir la figure de droite page 87) et les spins sont de plus en plus désordonnés.

Que se passe-t-il quand on plonge le matériau dans un champ magnétique intense ? L'écart entre les niveaux d'énergie des spins augmente (on a d'ailleurs le même effet sur les niveaux d'énergie des molécules d'un gaz dont on diminue le volume). Cependant, si le processus est rapide, les spins n'ont pas le temps de se réorganiser et les populations de chacun des niveaux restent inchangées : avec un champ augmenté, cela n'est possible que si la température elle-même s'est accrue d'autant : l'assemblée de spins est plus chaude !

Le reste du matériau étant resté à la même température, il s'ensuit une phase où l'ensemble des spins refroidit un peu tandis que le reste du matériau s'échauffe. Le résultat final est que le matériau se retrouve à une température plus élevée qu'au départ, ce qui caractérise justement l'effet magnétocalorique.

les conférences

au Palais de la découverte

dans la limite des places disponibles

Trois conférences proposées par l'Académie de l'air et de l'espace

Quel modèle cosmologique ?

Autrefois hautement spéculative, la cosmologie est devenue une science d'observation. Que donne la confrontation observation/théorie ?

> jeudi 5 février

14h La mesure de l'Univers, de l'Antiquité à aujourd'hui
avec Jean-Pierre Luminet, astrophysicien

15h L'Univers révélé par le satellite Planck
avec Alain Riazuelo, chargé de recherche à l'Institut d'astrophysique de Paris

16h Les limites de notre modèle cosmologique
avec Jean-Philippe Uzan, astrophysicien

En partenariat avec

Académie de l'Air et de l'Espace
Air and Space Academy

Avec soutien de

SCIENCE

FUTURA SCIENCES

plus

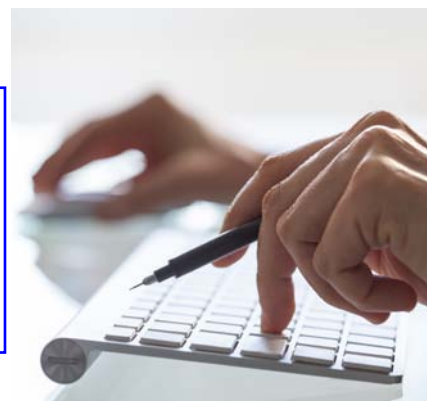
programme complet sur palais-science.fr

QUESTION AUX EXPERTS

Faut-il prendre des notes à la main ou à l'ordinateur ?

À la main. Des études indiquent qu'ainsi, la mémorisation des informations et leur compréhension sont favorisées.

Cynthia MAY



Les étudiants écrivent bien plus vite au clavier qu'à la main. Dès lors, ceux qui utilisent des ordinateurs portables en classe ont tendance à prendre plus de notes, reproduisant parfois mot pour mot le discours du professeur. Mais est-ce vraiment un avantage ?

En 2014, Pam Mueller, de l'Université de Princeton, et Daniel Oppenheimer, de l'Université de Californie à Los Angeles, ont mené plusieurs expériences pour le déterminer. Ils ont demandé à des étudiants de prendre des notes pendant une conférence, puis ont évalué leur mémorisation des données factuelles, leur compréhension des concepts et leur capacité à synthétiser et généraliser les informations. La moitié des étudiants devaient écrire avec un ordinateur portable, et l'autre moitié à la main. Les chercheurs ont trouvé que les seconds avaient une meilleure compréhension conceptuelle et exploitaient mieux les données que les premiers.

Les chercheurs l'expliquent par les différents traitements cognitifs impliqués par les deux modes de prise de notes. La lenteur de l'écriture à la main force les étudiants à digérer et résumer l'information, dont ils ne peuvent transcrire que l'essentiel. Ces efforts favorisent la compréhension et l'apprentissage. À l'inverse, taper à l'ordinateur permet de noter toutes les paroles du professeur sans en traiter le sens.

Peut-on améliorer les performances des utilisateurs d'ordinateurs en leur

demandant explicitement de réfléchir aux informations et de les retranscrire dans leurs propres mots ? C'est ce qu'ont tenté P. Mueller et D. Oppenheimer, mais sans succès. Les étudiants ont continué de faire du mot à mot et n'ont pas mieux synthétisé les informations.

Plus efficace même longtemps après

La plupart des études comparant la prise de notes à la main et au clavier ont testé les souvenirs peu de temps (généralement moins d'une heure) après la session d'apprentissage. En situation réelle, cependant, les étudiants sont souvent évalués des jours, voire des semaines, après le cours. Les informations supplémentaires retranscrites par ceux qui écrivent à l'ordinateur les avantagent-elles lorsqu'ils révisent leur leçon après un long délai ?

Non, à nouveau. Dans l'une des expériences, P. Mueller et D. Oppenheimer ont évalué les deux groupes de participants une semaine après le cours. Là encore, ceux qui avaient pris des notes à la main ont obtenu les meilleures performances. Ces notes, qui incluent les propres mots et l'écriture des étudiants, semblent rappeler plus efficacement les souvenirs, en recréant aussi bien le contexte (les processus de pensée, les émotions, les conclusions) que le contenu (notamment les données factuelles) de la session d'apprentissage.

Ces résultats ont des implications importantes pour les étudiants qui se fondent sur du contenu mis en ligne par les enseignants. Quand ils ne prennent aucune note, ils n'organisent pas les informations et ne les synthétisent pas dans leurs propres mots. Ainsi, ils ne s'engagent pas dans le travail mental qui favorise l'apprentissage.

Outre leur impact sur les processus cognitifs, les ordinateurs posent d'autres problèmes dans la salle de cours. Un accès Internet y est souvent disponible, avec son lot de distractions associées : messageries, jeux en ligne... Des études suggèrent que lorsque les étudiants utilisent des ordinateurs portables, ils passent 40 % du cours sur de telles distractions et sont finalement moins satisfaits de l'enseignement. En 2011, Jeff Sovern, de l'Université de Saint John, à New York, a montré que dans une faculté de droit, près de 90 % des utilisateurs d'ordinateurs portables pratiquaient des activités en ligne sans lien avec le cours pendant au moins cinq minutes.

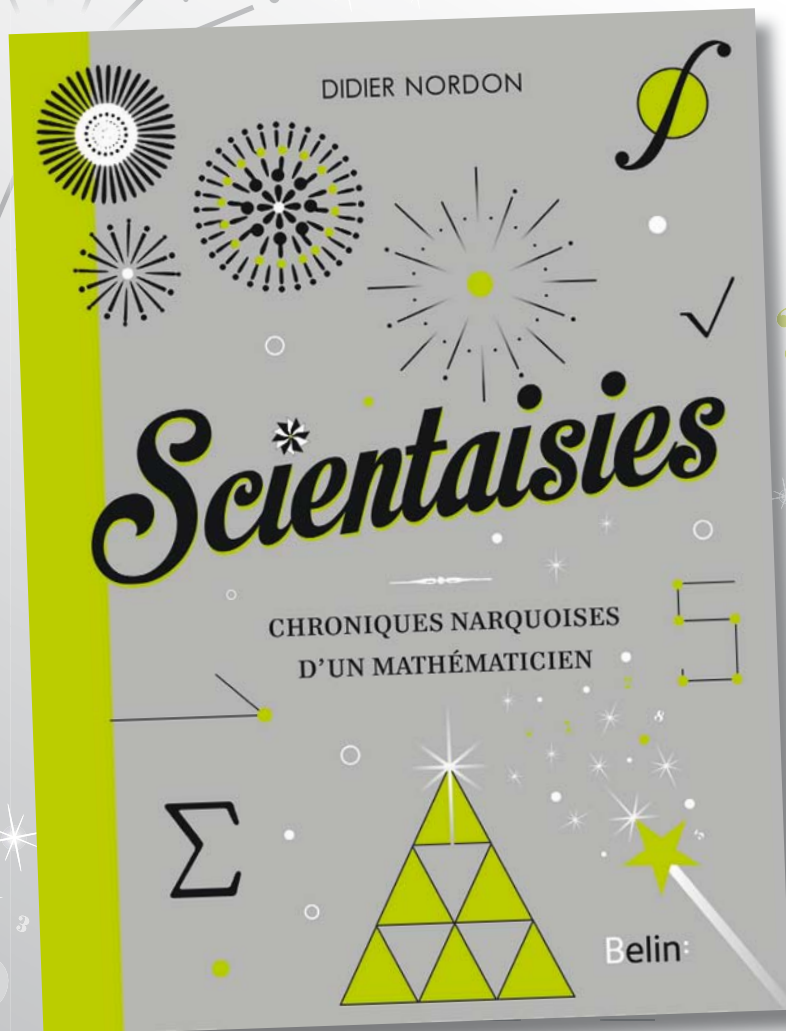
Les innovations techniques peuvent façonner les expériences éducatives, souvent de manière positive. Cependant, les travaux de P. Mueller et D. Oppenheimer rappellent qu'aller plus vite ne favorise pas toujours l'apprentissage, et que nous devons encourager les processus cognitifs, exigeants en termes d'efforts, qui le sous-tendent. ■

Cynthia MAY est professeur de psychologie à l'Université de Charleston, aux États-Unis.

LE MARIAGE DE L'HUMOUR ET DE LA SCIENCE

par Didier Nordon

Nouveauté
POUR LA
SCIENCE



SCIENTAISIES

CHRONIQUES NARQUOISES

D'UN MATHÉMATICIEN

Le croisement de la science et de la fantaisie donne naissance à des Scientaisies, chroniques qui alimentent le Bloc-Notes de Didier Nordon dans le mensuel *Pour la Science*. Des billets d'humour, joliment illustrés de dessins humoristiques ; à savourer sans modération en commençant par le dernier si votre humeur vous y incite !

Editions Belin/Pour la Science
158 pages - 15€ - 12/11/2014
ISBN 978-2-8424-5196-7

**FLASHEZ CE QR CODE
ET COMMANDEZ
DIRECTEMENT VOTRE LIVRE**



BON DE COMMANDE

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à :
Groupe Pour la Science - 628 avenue du Grain d'Or - 41350 Vineuil
E-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

POUR LA
SCIENCE

☐ **Oui**, je commande l'ouvrage *Scientaisies* de Didier Nordon



exemplaires x 15€ (Réf. 84295196)

Frais de port (3€ France - 12€ Étranger)

Total à régler

l'indique mes coordonnées :

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____
CP : _____ Ville : _____
Pays : _____

tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

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

☐ Par carte bancaire

Numéro : _____

Date d'expiration : _____

Cryptogramme : _____

Signature obligatoire

In 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 la case ci-contre ☐.

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscule).

@

SCIENCE & GASTRONOMIE

L'alcool, préhispanique aussi

L'analyse de lipides présents dans des poteries du Mexique ancien révèle qu'on y pratiquait la fermentation alcoolique il y a plus de 2 000 ans.

Hervé THIS

Depuis quand l'espèce humaine consomme-t-elle de l'alcool ? Depuis toujours... car les tissus végétaux contiennent en abondance du glucose, du fructose et du saccharose, sucres qui peuvent fermenter et engendrer de l'éthanol. Des mesures spectroscopiques montrent que même des carottes ayant attendu sur un étal produisent de l'éthanol.

Pourquoi consommons-nous ce composé ? Tout ce qui se rapporte au vivant doit s'interpréter en termes de biologie de l'évolution. Quand ils consomment des fruits, riches en sucres, les animaux contribuent, en dispersant les graines, à la propagation des végétaux. En 2008, avec des collègues, Frank Wiens et Annette Zitzmann de l'Université de Bayreuth ont même montré que les ptilocerques de Low, de petits mammifères placentaires de Malaisie, sont friands des fruits fermentés de certains palmiers et les dispersent.

L'addiction des animaux à l'éthanol aide ainsi les végétaux à se reproduire. Mais quel est l'intérêt pour les animaux ? Steven Brenner et ses collègues, à l'Université de Gainesville en Floride, ont cherché la réponse dans les gènes. Ils ont traqué les diverses formes du gène codant l'enzyme alcool déshydrogénase 4. L'enzyme dont nous sommes aujourd'hui équipés permet un métabolisme de l'éthanol 50 fois plus efficace que les autres formes. En 2013, l'équipe de S. Brenner a découvert qu'elle serait apparue il y a 10 millions d'années, quand des lignées de lourds primates ont

quitté les arbres pour vivre sur le sol, où les fruits tombent et fermentent naturellement. Les gènes de cette forme d'enzyme active auraient été propagés parce qu'ils avantageaient les individus capables d'exploiter ces ressources énergétiques.

Il y a cependant une différence entre consommer des fruits fermentés et fabriquer des boissons contenant de l'éthanol. Les humains semblent avoir produit de l'alcool très tôt : on a trouvé au Moyen-Orient des jarres à bière qui datent de 12 000 ans, et la fermentation de la bière aurait précédé celle du pain. Pour le vin, des représentations égyptiennes datent d'il y a 6 000 ans.

Dans le Nouveau Monde, l'analyse de résidus organiques d'objets trouvés dans les ruines de Teotihuacan, au Mexique, vient de montrer que les populations préhispaniques d'Amérique produisaient du pulque, boisson fermentée à partir de la sève d'agave, il y a presque deux millénaires.

Teotihuacan était un gros centre urbain de la Mésoamérique : fondée en 150 avant notre ère, la ville était peuplée de 100 000 habitants sur 20 kilomètres carrés. L'altitude, l'aridité et les ressources limitées en eau y rendaient la culture du maïs difficile, et des fèves ont dû être consommées pour pallier les insuffisances en micronutriments et en acides aminés essentiels. Les agaves, qui supportent le froid et la sécheresse, ont une sève riche en saccharides, de sorte qu'ils ont dû contribuer à l'alimentation humaine dès l'époque préhispanique. Les populations fermentaient-elles cette sève, qui a l'aspect d'un lait ?

Des représentations murales semblaient figurer des consommations de pulque, et l'on avait également trouvé des récipients pouvant corroborer l'idée d'une telle consommation.

À l'Université de Bristol, Marisol Correa-Ascencio, Richard Evershed et leurs collègues ont recueilli des résidus organiques sur des poteries archéologiques (313 artefacts) et les ont analysés. La principale bactérie participant à la fermentation de ce jus, avec les levures, est *Zymomonas mobilis*, dont la membrane contient des concentrations très élevées en lipides hopanoïdes, notamment le tétrahydroxybactériohopane et ses dérivés. Les composés de ce type sont largement utilisés comme biomarqueurs. Les chimistes de Bristol ont comparé ces résidus à ceux obtenus par des expériences de vieillissement accéléré, et ont découvert que des composés hopanoïdes étaient présents dans les poteries.

Et si, finalement, c'était la fermentation alcoolique dirigée qui était le propre de l'homme ? ■



Hervé THIS, physico-chimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la Fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr



© JEAN-PAUL LUTZ

■ GÉOSCIENCES

Terre, portrait d'une planète

Steve Marshak

De Boeck, 2014
(944 pages, 90,50 euros).

Traduit de l'anglais par Olivier Évrard, cet ouvrage (une seconde édition) est un imposant manuel des synthèses des savoirs et savoir-faire en sciences de la Terre. Organisé de façon thématique, il couvre un spectre extrêmement large, depuis la formation du Système solaire jusqu'aux variations du climat au cours des 4,57 milliards d'années d'existence de la Terre, en passant par la dynamique interne de notre planète et la genèse des ressources naturelles. La diversité des sujets abordés et des outils traités illustre la convergence entre la géologie et les géosciences, en progression constante ces dernières années.

Le sommaire détaillé et didactique guide efficacement le lecteur à travers la diversité des sujets traités et la complexité du milieu naturel. Chaque chapitre débute par une introduction des notions fondamentales et par un questionnement scientifique formulé de manière simple et directe. Ainsi, l'organisation de ce livre est résolument orientée vers la présentation de la démarche scien-

tifique en sciences de la Terre, intégrant la mise en œuvre des connaissances et des méthodes d'investigations pour aborder les différentes enveloppes du globe et proposer des interprétations débouchant sur la conception de modèles soutenus par des observations naturelles.

Claire et agréable, la rédaction est enrichie de nombreux exemples concrets venant en appui des notions théoriques et des concepts. Les outils et méthodes sont introduits au fur et à mesure qu'ils se révèlent nécessaires dans la compréhension des thèmes. Les illustrations sont particulièrement esthétiques. Elles comprennent des schémas explicatifs qui assurent le lien entre les données naturelles, souvent difficiles à appréhender de par leur complexité, et leurs interprétations.

Le format du livre permet d'intégrer de nombreuses cartes et de magnifiques photographies de roches, de paysages panoramiques et de vues de la Terre depuis l'espace. Elles ne remplacent pas l'appréhension sur le terrain de la dimension des objets géologiques, mais elles illustrent la diversité des objets géologiques et l'intégration des échelles du minéral à la planète.

Ainsi, l'auteur réussit le tour de force de faire le lien entre l'approche naturaliste et la quantification des processus physico-chimiques qui régulent la dynamique terrestre. Il sait admirablement mêler les questions fondamentales sur l'origine et le fonctionnement de la Terre avec leurs déclinaisons sociétales, telles l'origine des ressources minérales et énergétiques, la gestion durable de l'environnement ou l'évolution problématique du climat.

Olivier Vanderhaeghe

Université Paul Sabatier, Toulouse



■ BOTANIQUE

Les plantes qui guérissent, qui nourrissent, qui décoorent

Jean-Marie Pelt

Chêne, 2014
(496 pages, 35 euros).

L'auteur, botaniste et écologue de renom, nous offre un très bel ouvrage, richement illustré par de superbes planches botaniques anciennes. Il y retrace la place incomparable du règne végétal dans les rapports de l'homme à son écosystème.

La nature, « œuvre de la vie et fruit d'une longue évolution », présente un florilège de plantes d'une très grande variété, donc précieux pour se soigner, se nourrir et s'émerveiller. Avec sa verve personnelle où s'exprime si bien son amour de la nature, Jean-Marie Pelt nous fait partager sa passion au fil d'une déambulation champêtre.

Le livre est organisé en trois grandes parties (propriétés thérapeutiques et toxicologie des plantes ; céréales, épices et autres plantes comestibles ; fleurs et plantes décoratives), chacune se déclinant ensuite selon une classification plus pragmatique que strictement botanique. Grâce à cette organisation, le lecteur peut s'orienter sans peine dans cette foison de fiches, toutes plus intéressantes les unes que les autres et illustrées par des reproductions de toute beauté.

Jean-Marie Pelt comble la curiosité du lecteur en contant la saga et la pérégrination de ces plantes qui meublent aujourd'hui notre quotidien. Il nous décrit fort astucieusement la manière dont l'homme s'est approprié ces végétaux pour en faire la base de son alimentation ou de ses médicaments sous leurs différentes formes galéniques. « La

beauté sauvera le monde », disait Dostoïevski. C'est par cette citation que se referme ce livre. « La beauté et la bonté », complète Jean-Marie Pelt : car c'est toute une philosophie et un huma-



nisme réjouissant qu'il nous livre à travers sa passion. Un livre que l'on « effeuille » avec bonheur et que complète utilement l'index des quelque 310 plantes décrites.

Bernard Schmitt
CERN

■ ARCHÉOLOGIE

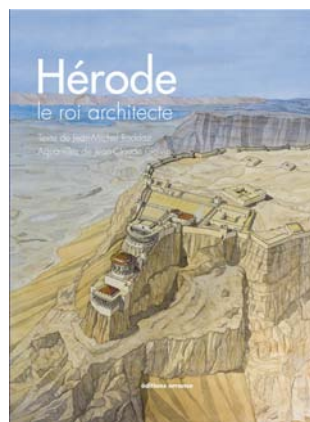
Hérode, le roi architecte

Jean-Michel Roddaz
et Jean-Claude Golvin (dessins)

Actes Sud-Errance, 2014
(168 pages, 39 euros).

Le roi Hérode a laissé de lui un portrait peu flatteur : les chrétiens l'ont accusé du massacre des Innocents, qui n'a sans doute jamais eu lieu, et les Juifs de l'époque lui ont reproché l'origine arabe de sa mère et ses sympathies pour Rome, bien réelles celles-ci. Les historiens actuels portent sur le personnage un jugement plus nuancé et Jean-Michel Roddaz, qui ne cache rien, s'attache à un aspect souvent ignoré de son œuvre : Hérode fut un roi bâtisseur.

Hérode est d'emblée replacé dans son contexte. Les Juifs, emmenés par les Macchabées, avaient chassé les Syriens et repris Jérusalem en -165; ils ont alors connu une grande époque, mais l'aventure s'est terminée avec l'arrivée de Pompée qui, lui aussi, prit Jérusalem, en 63 avant notre ère. Hérode, né en -73, devint roi et il fut reconnu comme tel par le Sénat de Rome en -40; il mourut en l'an 4 avant notre ère, sans doute au moment de la naissance du Christ (qui n'est pas né en l'an 1, comme on sait). Son amitié pour les maîtres du monde l'a conduit sur le chemin de tous les grands de l'époque: César, Antoine, l'inévitable Cléopâtre et Auguste, pour ne citer que les plus importants. C'est précisément ce que lui reprochaient ses sujets, qui voyaient en lui non seulement un demi-Arabique, mais aussi un ami des oppresseurs.



L'intérêt du livre tient à ce que le roi, entre 40 et 4 avant notre ère, fit construire de nombreux monuments pour embellir des villes, pour y résider et pour défendre son royaume; l'influence gréco-romaine y est partout très présente. En particulier, deux ouvrages ont embelli Jérusalem, à savoir la forteresse Antonia, qui était son palais, et, plus encore, le Temple de Salomon,

le lieu le plus sacré du judaïsme. Le Temple fut détruit en 70 de notre ère par l'empereur Titus; il n'en reste que le soubassement, connu aujourd'hui sous le nom de Mur des Lamentations. Autres villes, autre propos: Samarie (devenue Sébastè en l'honneur d'Auguste) et Césarée furent conçues comme des modèles de romanité; Hérode y fit installer tout ce qui faisait le charme des villes romaines et que les Juifs condamnaient. Il veilla aussi à se loger confortablement et, outre l'Antonia, il se fit construire une résidence d'hiver à Jéricho. Pour protéger son pays contre d'éventuels agresseurs, il fit ériger trois forteresses, des citadelles quasiment imprenables (sauf pour l'armée romaine), à Cypros, Machéronte et Massada, devenue un haut lieu historique pour les Israéliens. Pour être complet, ajoutons le Tombeau des Patriarches à Hébron et l'Héro-dion, au Sud de Jérusalem, qui était un mémorial.

Afin de faciliter la lecture et la compréhension du texte, J.-M. Roddaz a fait établir des cartes fort utiles, des tableaux chronologiques précieux et une bibliographie très concise.

Yann Le Bohec
Professeur émérite
à l'Université Paris-IV-Sorbonne

SOCIOLOGIE

Les maîtres expliqués à leurs chiens

Christophe Blanchard
La Découverte, 2014
(158 pages, 14 euros).

L'étude des animaux domestiques a longtemps été négligée par les scientifiques. Cela surprend, puisqu'ils sont faciles à observer. En réalité, ils sont plus difficiles à comprendre



que leurs frères sauvages. En effet, d'une part, ils ont été très modifiés par l'homme; d'autre part, ils se trouvent hors du contexte naturel qui explique bien des curiosités animales. Cette situation est en train de changer et j'y souscris, ayant moi-même cédé à l'attrait de ces espèces qui sont le reflet de l'homme.

Maître de conférences à l'Université Paris 13, l'auteur a suivi, pendant son service militaire, une formation de maître-chien. Il n'est pas le premier sociologue à s'intéresser au plus proche ami de l'homme: Dominique Guillo, chercheur au CNRS, avait déjà publié en 2009 aux éditions du Pommier *Des chiens et des hommes*. L'ouvrage en question ici est plus modeste par son prix, sa pagination et son contenu. Il est illustré par des photographies que collectionne l'auteur.

Toujours dans l'approche distanciée du chien vu par l'homme que suggère le titre, l'auteur réécrit par exemple le naufrage du *Titanic*... Ce même funeste 15 avril 1912 venait d'avoir lieu un défilé des nombreux chiens de race présents sur le bateau: «Les trois survivants ne durent leur salut qu'à l'intransigeance de leurs propriétaires – des passagers de la première classe qui exigèrent, au mépris des consignes données, que leurs



Comprendre la physique

D. Cassidy, G. Holton et J. Rutherford
PPUR, 2014
(812 pages, 25 euros).

En physique, les notions sont concrètes et les raisonnements simples: c'est leur accumulation qui crée la complexité. Les bases des théories physiques sont ici passées en revue dans la première édition française d'un célèbre texte de vulgarisation américain de 2002. Didactique, le texte est agrémenté de ce qu'il faut d'éléments historiques pour faire récit; seules les formules essentielles sont reproduites, qui sont toujours simples, comme les schémas proposés. Convient au débutant qui veut acquérir une première culture, ainsi qu'à l'expert qui réexamine la sienne.



Les dinosaures de Provence

Stephen Giner
Les Presses du Midi, 2014
(88 pages, 29 euros).

La Provence recèle de nombreux sites fossilifères. Infatigable chercheur de terrain attaché aux Muséum d'histoire naturelle de Toulon et du Var, l'auteur présente nombre de sites et de cas de dinosaures remarquables, les uns jurassiques et les autres crétacés. Plus qu'un traité de la question, c'est un témoignage personnel sur la recherche paléontologique dans les durs terrains de Provence, où les amateurs jouent toujours un rôle essentiel.

Au cœur des atomes froids



J.-F. Dars et A. Papillault
Éditions rue d'Ulm, 2014
(144 pages, 14 euros).

Ce beau petit livre dresse le catalogue des recherches menées à l'Institut français de recherche sur les atomes froids, ou IFRAF. À qui n'est pas physicien, les brefs textes de présentation des recherches diverses rendues possibles par le refroidissement d'atomes à un milliardième de degré au-dessus du zéro absolu paraîtront ésotériques. L'intérêt réside surtout dans les images d'équipes au travail, qui produisent une forte impression: elles convoient bien la concentration des chercheurs et leur plaisir à communier intellectuellement dans une atmosphère plus chaleureuse que celle de leurs atomes!



Symboles et mystères

Alain Bénard

Errance, 2014

(222 pages, 39 euros).

L'admirable travail du Groupe de recherche et de sauvegarde de l'art rupestre (GERSAR) prend ici la forme d'une thèse bien illustrée sur l'art rupestre sur grès du Sud de l'Île-de-France. Il n'en fallait pas moins pour commencer à décrire de façon systématique les quelque 1200 abris ornés aujourd'hui repérés par le groupe. Souvent des quadrillages, les ornements qu'ils contiennent ne sont pour la plupart pas figuratives, sont souvent pollués par des graphismes modernes, et attribués pour la plupart au Mésolithique.



Un monde de camps

Michel Agier (dir.)

La Découverte, 2014

(432 pages, 25 euros).

Selon les Nations unies, plus d'un milliard de personnes vivent dans des bidonvilles, parmi lesquels beaucoup de camps provisoires devenus permanents. Sous la direction de deux anthropologues du contemporain, les auteurs passent en revue des cas typiques, dont Chatila (camp palestinien au Liban), Kacha Garhi (Afghanistan), Mae La (camp karen à la frontière thaïlando-birmannaise), Sainte-Livrade (le camp d'accueil des réfugiés d'Indochine), Pavarando (camp de déplacés en Colombie) ou encore Calais (camp de sans-papiers en France). Trois fonctions des camps sont identifiées : refuge, réserve de travailleurs dans l'économie locale et centre de rétention.

Les constructions mathématiques avec des instruments et des gestes



Evelyn Barbin (dir.)

Ellipse, 2014

(320 pages, 31 euros).

Outre la célèbre quadrature du

cercle, les géomètres grecs se sont intéressés à la duplication du cube, à la trisection de l'angle et à la construction de polygones réguliers... Autant de sujets qui font les chapitres de ce livre, où les recherches plus ou moins fructueuses de solutions à diverses époques de l'Antiquité et des temps modernes sont racontées et placées dans leurs contextes historiques. Des figures (simples) facilitent évidemment la lecture.

toutous grimpent avec eux sur les canots de sauvetage. » Ce fut le cas du loulou de Poméranie de madame Rothschild, qui réussit à le dissimuler dans son manteau. Sauvé des eaux, le loulou se fit écraser par une voiture à son arrivée sur la terre ferme. Toujours à propos des chiens, bien des sujets sont évoqués ; ainsi Séverine, cette féministe qui, vers 1900, prit Sac-à-Tout comme héros d'un roman qu'elle lui dédicaça ainsi : « Parce que je ne suis "qu'une" femme, parce que tu n'es "qu'un" chien, parce qu'à des degrés différents, sur l'échelle sociale des êtres, nous représentons des espèces inférieures au sexe masculin – si pétri de perfections ! –, le sentiment de notre mutuelle minorité a créé entre nous plus de solidarité encore, une compréhension davantage parfaite ».

On apprend aussi que des études de psychologie sociale ont prouvé qu'un jeune homme accompagné d'un chien obtenait trois fois plus de numéros de téléphone des jeunes filles rencontrées, et que son score explosait « lorsque l'individu était secondé par un chiot ».

Mais le sujet récurrent de cet « essai de sociologie canine » concerne curieusement le lien entre sans-abri et chiens de rue. Il s'agit du sujet de thèse de l'auteur, qui se fait tout au long de l'ouvrage l'avocat des « punks à chiens ». Le livre est émaillé des témoignages de ces éclopés de la vie qui s'appuient sur une autre espèce, tel celui-ci : « Moi, je considère que mon chien est mon meilleur ami. [...] Il ne me laissera jamais tomber, contrairement à beaucoup d'humains qui m'ont tourné le dos. Ma famille en premier ! Par contre, Léo, lui, c'est un mec droit ! »

Pierre Jouventin

Chercheur émérite au CNRS

PSYCHOLOGIE-MÉDECINE

Aux prises avec la douleur

Michel de Fornel et Maud Verdier

Éditions de l'EHESS, 2014

(352 pages, 18 euros).

Parmi l'ensemble des manifestations pathologiques, la douleur, qu'elle soit physique ou morale, est une constante d'autant plus difficile à cerner qu'elle reste totalement subjective. Expérience par essence individuelle, elle reste largement incommunicable, tant dans sa réalité que dans son intensité. Elle est d'autant plus insupportable que ni les proches ni les soignants ne sont en mesure, quel que soit leur degré d'empathie, d'en prendre la pleine mesure et d'y répondre de façon totalement pertinente. Or ce qui est vrai pour l'adulte ou l'enfant normal, capable de raisonnement, de verbalisation et de conceptualisation, l'est encore plus dramatiquement quand il s'agit d'une personne privée de parole et de capacité d'expression.

Pour répondre à cette difficulté majeure, les auteurs nous livrent leur expérience nourrie par une approche à la fois philosophique et cognitive de la douleur associée à une pratique de consultation auprès d'enfants polyhandicapés, porteurs de maladies orphelines et, pour ces raisons, privés de parole et de gestuelle cohérente. D'un côté, comment dire sa douleur ? Sa nature et ses composantes ? Vers qui se tourner ? Question muette à une oreille de sourd ? De l'autre côté en effet, quelle perception le clinicien peut-il avoir de cet appel muet ? Comment, au-delà de l'examen clinique, le recueil de



sources d'informations disparates, transmises par la famille et les soignants, peut-il enrichir un acquis théorique de savoir et permettre une réponse adaptée ? À travers de multiples exemples de consultations, les auteurs construisent au fil des pages une méthodologie et nous font découvrir, par touches successives, comment les manifestations infraverbales (expression du visage, cris, posture du corps, etc.) sont à même de traduire le vécu de ces enfants et finissent par constituer un substrat conversationnel caractérisant chacun d'entre eux et sur lequel il est possible de s'appuyer pour répondre au mieux à cette insupportable souffrance.

Les auteurs concluent par une réflexion plus sociologique sur les multiples cadres dans lesquels s'exerce le pouvoir médical. La sanction diagnostique et thérapeutique en matière de douleur ne peut se contenter d'être un arbitrage réducteur entre subjectivité et objectivité : elle est le fruit d'une continuelle négociation à travers une pratique d'équipe.

Bernard Schmitt

CERN

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



OFFRE DÉCOUVERTE **POUR LA SCIENCE**



Pour la Science (12 n^{os})

1 an ■ 56 € seulement !
au lieu de ~~74,90 €~~

Vos avantages abonné

- ✓ 25 % d'économie
- ✓ la garantie de ne manquer aucun numéro
- ✓ l'accès gratuit aux versions numériques sur www.pourlascience.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À découper et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science • Service Abonnements • Libre réponse 90382 • 75281 Paris cedex 06

Oui, je m'abonne au magazine *Pour la Science* :

☐ 1 an • 12 numéros • 56 € au lieu de ~~74,90 €~~

+ de 25 % de réduction !

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 12 € – autres pays 25 €.

☐ 2 ans • 24 numéros • 106 € au lieu de ~~149,80 €~~

+ de 29 % de réduction !

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 25 € – autres pays 51 €.

Pour 20 € de plus, découvrez *Dossier Pour la Science* tous les trimestres !

Je préfère m'abonner à *Pour la Science* (12 n^{os}/an) + *Dossier Pour la Science* (4 n^{os}/an)

☐ 1 an • 16 numéros • 76 € au lieu de ~~102,70 €~~

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16 € – autres pays 35 €.



J'indique mes coordonnées :

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____
Pays : _____ Tél. : _____

Pour le suivi client [facultatif]

Je choisis mon mode de règlement :

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

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____

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

Signature obligatoire

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscules)

@

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 ☐.

LE SENS DE LA FORMULE

La phrase « un demi et un demi font un » est étrange : elle arrive à l'unité au moyen d'un verbe au pluriel. C'est que ce verbe a deux sujets – même s'ils ne

font qu'un ! À l'inverse, on dit « trois vaut deux et un ». Là, trois est sujet unique du verbe. D'où le singulier, bien que trois soit un pluriel.

Heureusement, la différence entre « égale » et « égalent » ne s'entend pas. Et nul ne se demande quelle orthographe serait correcte, vu qu'on n'écrit ni « égale » ni « égalent », mais =. Dans les formules $1/2 + 1/2 = 1$ et $3 = 2 + 1$, la grammaire française n'apparaît pas.

Les formules scientifiques ne sont soumises qu'à des règles de syntaxe logique. Aucune langue usuelle ne leur impose ses règles. D'où la légende selon laquelle les formules réalisent le miracle d'être universelles – indépendantes de toute langue usuelle, avec exactement le même sens et les mêmes connotations pour quiconque les lit, quelle que soit sa culture.

C'est prendre l'apparence pour la réalité. La langue est cachée, elle n'est pas éliminée. Dès que quelqu'un manie une formule, il l'interprète en la pensant avec les mots et les règles spécifiques de sa langue. Son appréhension de la formule est influencée par la vision du monde propre à cette langue. Pour qu'une formule reste universelle, il faut que personne ne la lise, c'est-à-dire qu'elle soit lettre morte – ou signe mort.

CONNAÎTRE OU IGNORER ?

Objection contre la science : ce monde ne mérite pas d'être connu », écrivait Emil Cioran (*Syllagismes de l'amertume*, Gallimard, 1976, p. 37).

Cette remarque est hasardeuse. Tant qu'on ne connaît pas le monde, comment savoir qu'il ne mérite pas de l'être ? Il m'est difficile pourtant de ne pas réagir comme Cioran lorsque des sociologues soutiennent

que, pour connaître l'état d'esprit d'une population, il faut lire attentivement la presse à deux sous, les romans de gare, les magazines illustrés, dont elle est friande. Y jeter un coup d'œil, en attendant le dentiste ou le coiffeur, soit, mais ces productions méritent-elles vraiment une étude soigneuse ?



Aucune réponse à cette question n'est satisfaisante. Répondre non passera pour de la morgue intellectuelle ; répondre oui, pour de la complaisance. Nous ne sommes pas plus avancés que Montaigne : « Je souhaiterais bien avoir plus parfaite intelligence des choses, mais je ne la veux pas acheter si cher qu'elle coûte » (*Essais*, II, X).

MÉTAPHYSIQUE DES VALEURS

Nombre de débats de société relèvent de la métaphysique. La consommation d'anxiolytiques ; les relations tissées entre l'individu et la collectivité par les loisirs, les associations, le travail (ou son absence) ; l'écologie ; les brevets sur le vivant ; la rémunération des mères porteuses ; le statut de l'embryon ; l'arrêt des traitements en fin de vie, etc. : ces questions touchent au rôle de l'homme dans la société, à sa place dans la nature, au sens de la vie, sa valeur, son but. Donc chacun y réagit selon des vues métaphysiques. Or les diverses réactions n'ont pas les mêmes conséquences économiques. Par exemple, si on prend le respect de la vie comme un absolu interdisant tout arrêt des traitements en fin de vie, la note sera lourde quand beaucoup de *baby boomers*

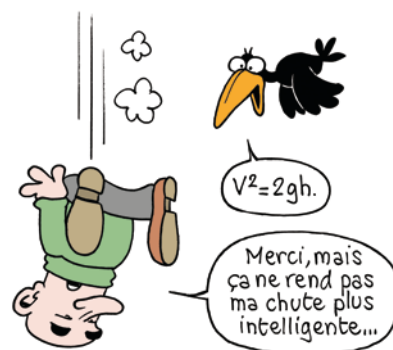
seront grabataires. Il n'est pas exclu que les contraintes économiques mènent alors notre société à encourager l'euthanasie des grands vieillards, donc à réviser ses valeurs.

Économie et métaphysique influent l'une sur l'autre. Un responsable politique ne devrait pas exposer ses projets économiques sans expliciter les valeurs métaphysiques qui les accompagnent. C'est difficile à concilier avec la neutralité qu'exige la laïcité, certes, mais a-t-on jamais vu un problème de société facile ?

CHUTE LIBRE, MAIS STUPIDE

J'ai fait une chute stupide », explique l'ami que vous voyez débarquer plus ou moins estropié. Stupide : pourquoi cette précision ? Une chute pourrait-elle ne pas l'être ?

Oui ! Il existe des chutes intelligentes. Et nous en avons tous fait beaucoup. Une chute est intelligente si elle enseigne quelque chose à celui qui en est victime. Or, lors de nos premiers pas, quand un rien provoquait notre chute, les adultes souriaient : « C'est le métier qui entre ». De fait, en tombant, nous avons appris à ne plus tomber. Quelques années plus



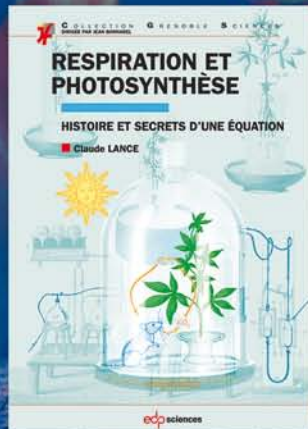
tard, d'autres chutes pédagogiques nous ont montré comment tenir sur un vélo.

Pour renouer avec les chutes intelligentes, un adulte n'a qu'à se lancer dans quelque nouvel apprentissage – l'acrobatie, par exemple, ou le funambulisme. Quant à moi, les chutes stupides que l'âge, petit à petit, va rendre de plus en plus probables suffiront à mon bonheur...

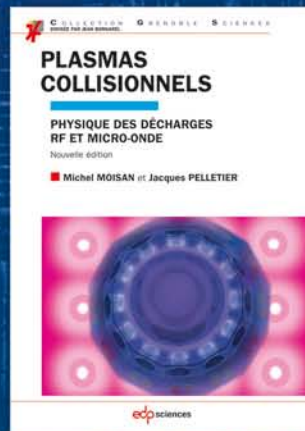
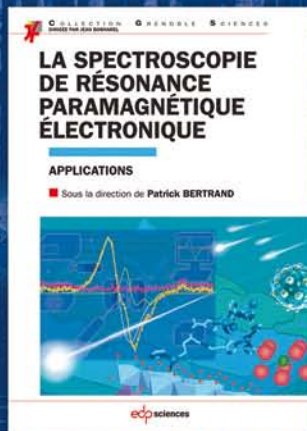
GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

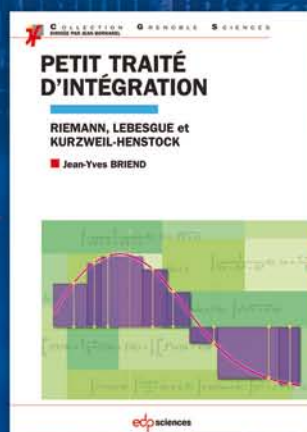
En 2014, Grenoble Sciences a labellisé
des ouvrages originaux pour des publics variés.



■ Pour un large
public cultivé



■ Une approche
originale d'un
concept bien
connu



■ Des livres de référence
de niveau Master

www.grenoble-sciences.fr

■ GRENOBLE SCIENCES

POUR COMMANDER : les ouvrages en français sont en vente dans le rayon Sciences
des librairies ou sur internet : <http://www.edition-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}



NOTO,
toute votre bibliothèque
avec vous, partout,
tout le temps.

Découvrez **NOTO**, la plateforme d'ouvrages interactifs. Grâce au code imprimé dans l'ouvrage, accédez à sa version numérique.

Profitez de toutes les possibilités offertes par **NOTO** : annoter, partager, archiver, travailler en mode online ou offline, grâce à l'application gratuite.

Une nouvelle façon d'enseigner et d'apprendre !

Vous souhaitez plus d'informations ? Contactez-nous : monavis@deboeck.com