

■ POUR LA

SCIENCE

Avril 2015 - n° 450

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Les routes de 5^e génération

Autoréparables,
écologiques, antibruit,
antibouchons...

M 02687 - 450 - F: 6,20 € - RD



Allemagne : 9,30 € - Belgique : 7,20 € - Canada /S : 10,95 CAD - Grèce /S : 7,60 € - Guadeloupe/St Martin /S : 7,30 € - Guyane /S : 7,30 € - Italie : 7,20 € - Luxembourg : 7,20 €
Maroc : 60 MAD - Martinique /S : 7,30 € - Nlle Calédonie Wallis /S : 980 XPF - Polynésie Française /S : 980 XPF - Portugal : 7,20 € - Réunion /A : 9,30 € - Suisse : 12 CHF.



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

En tant qu'agent du service public, vous vous engagez pour les autres, alors GMF s'engage pour vous en vous proposant, par exemple, d'assurer votre véhicule même lorsque vous l'utilisez pour des déplacements professionnels, sans supplément de cotisation. Et pour aller plus loin, GMF propose des garanties spécifiques liées à votre fonction : une garantie perte de revenu (traitement et primes) en cas d'arrêt de travail, des solutions d'épargne sûres et disponibles pour commencer à préparer votre retraite.

Rejoignez GMF - 1^{er} assureur des agents des services publics.

Pour en savoir plus rendez-vous sur www.gmf.fr

* 50 € pour l'assurance Auto Pass et 50 € pour l'assurance Santé Pass. Offre réservée aux jeunes agents des services publics de moins de 30 ans, la 1^{ère} année, à la souscription d'un contrat d'assurance auto. Offre valable jusqu'au 31/12/2015.

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 sa filiale GMF Assurances. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

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 adjoint : Sébastien Bohler

et Bénédicte Salthun-Lassalle

Rédacteur : Guillaume Jacquemont

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 :

Olivier Doaré, Sébastien Dutertre, Radouane Gannouji, Évelyne

Host-Platret, Éric Lagadec, Romain Lagrange, Caroline Martel,

Sébastien Michelin, Florian Moreau, Laurence Perotto,

Christophe Pichon.

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(j.f.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

Tél. : 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 American » sont la propriété de

Scientific American, Inc. Licence accordée à

« Pour la Science S.A.R.L. ».

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

interdit de reproduire intégralement ou partiellement

la présente revue sans autorisation de

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

droit de copie [20 rue des Grands-Augustins -

75006 Paris].



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

En route vers la 5G !

En France, environ 83 % des ménages possèdent au moins une voiture. Pour rouler avec, ils disposent d'un réseau routier de 1 065 000 kilomètres, dont 16 000 kilomètres d'autoroutes. Et les déplacements routiers quotidiens d'une personne mobile représentent près de 55 minutes en moyenne. C'est beaucoup. De fait, les déplacements automobiles occupent aujourd'hui une place si importante que nous avons du mal à imaginer un monde où la « bagnole » aurait disparu !

L'invention des véhicules motorisés, leur démocratisation et la construction de routes de troisième et quatrième générations (les routes asphaltées et les autoroutes, après les chemins muletiers puis les voies romaines) ont largement contribué à l'essor économique du XX^e siècle. Cela a aussi apporté une formidable liberté

De la technologie pour des routes en phase avec leur époque.

aux individus, qui pouvaient désormais parcourir des centaines de kilomètres en quelques heures pour aller où bon leur semblait.

Mais il n'y a pas eu que des bienfaits. Bruit, pollution atmosphérique, accidents, destruction des paysages, encombrements ont assombri le tableau. Une situation aggravée par une certaine conception de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire : l'un des effets délétères de la division de l'espace en cités résidentielles, centres commerciaux, quartiers d'affaires, campus, etc. a été une augmentation considérable de la mobilité contrainte.

Cependant, les scientifiques et les industriels nous préparent un avenir routier plus rose. Les techniques qu'ils développent rendront prochainement les routes silencieuses, écologiques, sûres, fluides, peu gourmandes en ressources... (voir pages 26 à 35). Ces routes de cinquième génération seront en phase avec leur époque. Au service d'une mobilité raisonnée et libre ? ■

3 **Edito**

Actualités

- 6 **Comment l'embryon se replie**
- 8 **Ces gènes qui ont fait pousser notre cerveau**
- 11 **Énergie sombre : des modèles quasiment éliminés**
- 13 **Des rides hexagonales ou labyrinthiques**



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Point de vue**
Comment rendre utiles les débats publics
Michel Callon
- 16 **Entretien**
« L'hygiène lumineuse est essentielle, au même titre que l'hygiène alimentaire »
Claude Gronfier
- 20 **Lu sur SciLogs.fr**
Le cœur délaissé de la science
Richard Taillet
- 23 **Homo sapiens informaticus**
Pourquoi les informaticiens rêvent d'immortalité
Gilles Dowek
- 24 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Radicalisation djihadiste : attention aux probabilités
Gérald Bronner

Ce numéro comporte deux offres d'abonnement spéciales en p. 21 et 95.
En couverture : © Ivor Strelar/shutterstock ; Pour la science

À LA UNE

26 TECHNOLOGIE **Les routes de 5^e génération**

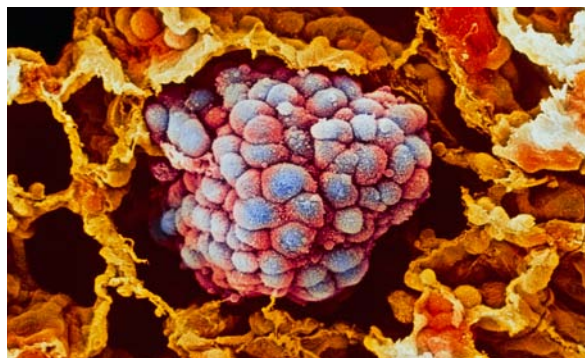
N. Hautière, C. de La Roche et J.-M. Piau

Économes en matériaux et en main-d'œuvre, non polluantes, productrices d'électricité, automatisées, sûres, etc. : les routes de demain devront répondre à des exigences nouvelles et nombreuses. Comment ?

36 MÉDECINE **Cancer : ces cellules qui perdent le contact**

Jean-Pascal Capp

Et si la cause première des cancers n'était pas une altération des gènes, mais un défaut de communication de cellules avec leur environnement ? Rétablir le contact pallierait les limites des thérapies actuelles.



44 PSYCHOLOGIE **Le bonheur est dans la maîtrise de soi**

Terrie Moffitt, Richie Poulton et Avshalom Caspi

On vit mieux quand on sait se contrôler dès l'enfance. C'est ce que suggère le suivi de milliers de personnes depuis la naissance. Faut-il alors entraîner les enfants à la maîtrise de soi dès leur plus jeune âge ?

52 **GÉOPHYSIQUE****Quand l'eau met le feu
aux volcans***Michel Detay*

Lorsque le magma remonte des profondeurs de la Terre, l'eau qu'il contient se transforme en vapeur. L'énorme volume occupé alors par ce gaz explique pourquoi les éruptions volcaniques sont avant tout une histoire d'eau.

62 **ASTROPHYSIQUE****Quelle est notre place
dans l'Univers ?***Caleb Scharf*

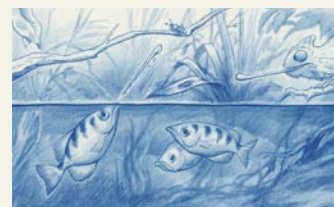
Pour savoir si la vie existe ailleurs dans l'Univers, il faut considérer les conditions de son émergence sur Terre : sont-elles très particulières, ou au contraire très communes ? La réponse est probablement entre les deux.

68 **HISTOIRE DES SCIENCES****L'animal, une colonie
d'organismes ?***Stéphane Schmitt*

Au XIX^e siècle, des naturalistes proposèrent qu'à l'image des coraux ou des salpes, les animaux soient constitués d'organismes plus petits. Cette théorie coloniale s'est perpétuée jusqu'à aujourd'hui.

**Rendez-vous**78 **Logique & calcul****De l'art avec les fractales***Jean-Paul Delahaye*

L'exploration de l'univers mathématique des fractales avec un ordinateur est un art analogue à la découverte esthétique du monde avec un appareil photo.

86 **Science & fiction****Tempête de sable sur Dune***J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq*88 **Art & science****Artistes et climat :
des relations
qui se réchauffent***Loïc Mangin*90 **Idées de physique****Le tireur embusqué
des mangroves***Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*93 **Question aux experts****Les enfants surdoués
sont-ils plus anxieux ?***Nicolas Gauvrit*94 **Science & gastronomie****De l'ail noirci ou bleui***Hervé This*96 **À lire**98 **Bloc-notes****Les chroniques de Didier Nordon****Aussi en numérique !****SCIENCE.fr****Archives**
depuis 1996**Application**
Smartphone et Tablette

Suivez-nous sur les réseaux sociaux



Actualités

Biologie du développement

Comment l'embryon se replie

Les premiers stades du développement des vertébrés s'apparentent à un jeu de pliage selon des pointillés.

Le développement précoce de l'embryon, pure biologie ou mécanique ? Depuis quelques années, les preuves s'accumulent en faveur d'un mélange des deux. Diverses équipes ont découvert que les contraintes mécaniques jouent un rôle important dans le modelage des tissus au cours de l'embryogenèse. Notamment, en 2009, Emmanuel Farge, de l'Institut Curie à Paris, et son équipe ont montré que des déformations mécaniques d'un embryon de drosophile entraînent l'expression de gènes du développement.

Toutefois, comment tout cela commence-t-il ? La première impulsion est-elle mécanique ou biologique ? Pour enquêter sur cette question digne du paradoxe de l'œuf et de la poule, trois physiciens et un biologiste ont scruté les premiers moments d'un embryon... de poulet. Ils ont ainsi montré qu'un mécanisme physique simple, une sorte de jeu de pliage selon des pointillés, transforme en une étape la petite masse informe de cellules des premiers instants en une organisation complexe de tissus distincts bien délimités.

Les études sur le sujet se concentraient sur la drosophile, la grenouille et la souris, tous manipulables génétiquement, mais dont les embryons en développement étaient difficiles à filmer à cause du caractère tridimensionnel des mouvements. Plat comme une omelette, l'embryon de poulet des premières heures est suffisamment mince pour que l'on puisse suivre au microscope les mouvements des cellules qui le constituent. Vincent Fleury, du laboratoire Matière et systèmes



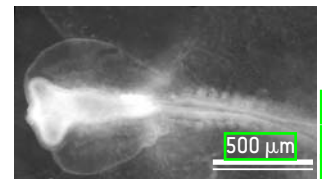
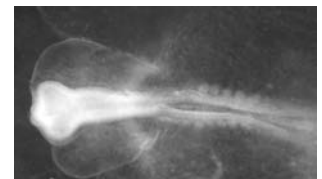
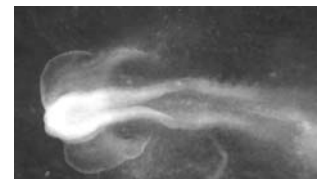
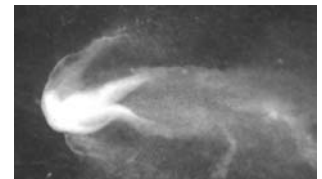
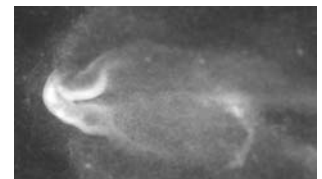
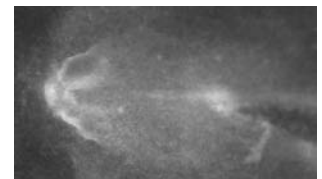
Au tout début de son développement, l'embryon de poulet se replie sur lui-même et délimite le tube neural (à droite, de haut en bas, images séparées de 100 minutes). Ci-dessus, l'embryon dix jours plus tard.

complexes (CNRS/Université Paris Diderot), et ses collègues ont ainsi filmé son développement pendant plusieurs heures et distingué les groupes de cellules qui le composent.

Au départ, l'embryon est un disque formé d'anneaux concentriques de cellules : un anneau périphérique avec de grandes cellules, un anneau intermédiaire avec des cellules moyennes et un disque central avec de petites cellules. Puis, au fil des heures, le disque se replie sur lui-même selon un axe (qui sera celui de l'animal), jusqu'à former le tube neural, qui donnera naissance à l'encéphale et à la moelle épinière. En suivant chaque anneau de cellules, Vincent Fleury et ses collègues

ont montré que non seulement ces domaines conduisent à des tissus différents (nerveux, musculaire, digestif, etc.), mais que la frontière entre deux domaines se plie dès le deuxième jour de développement.

La différence de taille des cellules d'un anneau à l'autre crée une différence de rigidité entre les deux domaines (plus les cellules sont petites, plus le domaine est rigide). Les frontières entre domaines constituent donc des discontinuités (les pointillés du pliage) où des plis se forment lorsqu'une force adéquate est appliquée. D'où vient cette force ? De la migration des cellules au fur et à mesure de leurs divisions, migration qui allonge peu à peu l'embryon. D'ailleurs, si



Médecine

Maladie de Lyme : une épidémie sournoise

Les cas de maladie de Lyme, transmise par des tiques, sont en augmentation dans de nombreux pays. Christian Perronne, qui dirige le Département d'infectiologie à l'hôpital de Garches, nous explique pourquoi cette affection bactérienne est sous-diagnostiquée.

Les chercheurs étirent eux-mêmes l'embryon, ils obtiennent les mêmes repliements.

Alors, qui a commencé ? Si la biologie est certes un déclencheur par les divisions cellulaires qu'elle produit, la mécanique agit elle aussi dès le début du développement. Mieux, à elle seule, elle expliquerait à la fois comment l'embryon acquiert sa forme et comment les cellules s'organisent en domaines spécialisés au stade précoce du développement.

Mais les interactions de la biologie et de la mécanique dans le développement embryonnaire sont encore loin d'être toutes comprises. Encore récemment, l'équipe de Magali Suzanne, du Laboratoire de biologie cellulaire et moléculaire du contrôle de la prolifération (CNRS/Université de Toulouse), a établi un lien inattendu entre les deux. En étudiant la formation du bourgeon de patte d'une drosophile, elle a montré que la mort programmée des cellules, l'apoptose, y joue un rôle mécanique clé.

On pensait que l'apoptose participait à la formation des structures par la réorganisation passive des cellules comblant les « trous » laissés. Les biologistes ont montré que les cellules mourantes ont un rôle actif : une sorte de dernier soubresaut les fait exercer une force sur leurs voisines *via* leurs jonctions, ce qui augmente la tension cellulaire. La synergie de plusieurs cellules apoptotiques dans un domaine restreint permet ainsi, elle aussi, la formation d'un pli. En biologie, la question de l'œuf et de la poule se poserait donc à toutes les étapes du développement...

Marie-Neige Cordonnier

V. Fleury et al., Eur. Phys. J. E., 12 février 2015 ; B. Monier et al., Nature, 21 janvier 2015

Qu'est-ce que la maladie de Lyme ?

Christian Perronne : La borréliose de Lyme tient son nom de la petite ville du Connecticut aux États-Unis, où l'on a découvert vers 1975 *Borrelia burgdorferi*, une bactérie transmise par les tiques. Elle présente le même tableau clinique de fièvres récurrentes, de douleurs articulaires et de problèmes cardiaques que nombre de maladies auto-immunes, et c'est pourquoi beaucoup de patients ne sont pas diagnostiqués.

On ne les teste pas ?

C. P. : Si, mais la sérologie n'est pas fiable. Outre le fait que les tests ont été développés pour identifier la souche américaine historique de *B. burgdorferi*, le seuil de détection a été fixé comme si la borréliose de Lyme était une maladie rare. En effet, lors de la mise au point du test, on n'a pas pu disposer d'un groupe témoin fiable, puisque le tableau clinique de Lyme évoque d'autres maladies. Résultat : à Boston, un groupe d'experts a fixé le seuil de détection en fonction de la prévalence plausible il y a 30 ans, soit 5 % maximum. Cela n'a plus aucun sens aujourd'hui.

Pourquoi ?

C. P. : Parce que, depuis, les recherches ont montré que plusieurs espèces du genre *Borrelia* provoquent des maladies similaires, dites de type Lyme. Bon nombre des personnes qui les ont contractées ne sont pas diagnostiquées.

Que leur arrive-t-il ?

C. P. : La maladie se développe, devient cyclique et la vie des patients se détériore, tandis qu'ils errent d'un médecin à l'autre. On finit souvent par les orienter vers des psychiatres censés les aider à maîtriser leurs troubles psychosomatiques...



Christian Perronne,
hôpital de Garches

Que fait-on lorsque la maladie est diagnostiquée ?

C. P. : Si elle l'est à la phase primaire de l'érythème migrant – une éruption cutanée circulaire – ou peu après, une antibiothérapie de deux ou trois semaines éliminera la bactérie ; sinon, il faut parfois plusieurs mois de traitement, sans certitude de réussite. Dans mon expérience, environ 20 % des patients atteints d'une maladie de Lyme chronique guérissent ; 60 % voient leur état s'améliorer fortement ; environ 20 % ne guérissent pas.

Le nombre de cas de borréliose de Lyme explose-t-il ?

C. P. : Il augmente beaucoup, et même officiellement, puisque sa prévalence officielle en France est passée en quelques années de 9 à 43 cas pour 100 000 habitants.

Comment cela s'explique-t-il ?

C. P. : D'une part par une prise de conscience de cette maladie : les patients, qui s'organisent, tentent de se faire entendre, et les médecins y pensent davantage. L'augmentation de la prévalence peut par ailleurs être liée à l'explosion des populations de cervidés, qui alimentent des tiques porteuses de *Borrelia*.

Comment pourrait-on améliorer la situation ?

C. P. : En commençant par en prendre la vraie mesure. Pour cela, il faut mieux détecter. Dans ce domaine, les vétérinaires ont beaucoup d'avance sur les biologistes médicaux. Murielle Vayssier, de l'École vétérinaire de Maisons-Alfort, emploie une méthode d'amplification génique (PCR) pour identifier les microbes. Sans doute est-ce là une des techniques utiles pour développer des tests diagnostiques humains plus fiables, afin de mieux détecter et de soigner plus tôt.

Les borrélioses sont-elles donc une nouvelle épidémie ?

C. P. : Une épidémie oui, mais nouvelle, non : mort il y a plus de 5000 ans, Cetz, l'homme des glaces, était atteint d'une borréliose. La bactérie qu'il portait avait 60 % de gènes en commun avec les *Borrelia* actuelles. Nous sommes dans une guerre ancienne face à un ennemi qui s'adapte en permanence !

François Savatier

C. Perronne, Front. in CIB, 2014

Climatologie

Une forêt fossile au large de l'Angleterre

Le changement climatique ? Un phénomène qui rendra le climat européen plus doux, mais qui risque, à long terme, de changer le trait de côte de nombreux pays. Dawn Watson vient de faire au large du Norfolk, en Angleterre, une découverte qui l'illustre de façon frappante, mais avec les effets d'un changement climatique... passé.

Membre de *Sea Search*, une association britannique de protection de l'environnement marin, cette plongeuse s'est récemment aventurée à quelque 300 mètres de la côte afin d'y examiner l'état des fonds, que de très fortes tempêtes ont bouleversés en 2013. Étonnée d'apercevoir au loin une « barrière noire », elle s'en est approchée et a découvert avec surprise qu'il s'agissait d'un amas d'énormes arbres fossilisés, jetés sur le fond comme s'ils avaient été abattus. Certains, des chênes, avaient encore des branches longues de plusieurs mètres.

Selon Julian Andrew de l'Université d'Est-Anglie, la



Les plongeurs de l'association anglaise *Sea Search* ont constaté que le bois fossile submergé est particulièrement apprécié des organismes marins, car ils peuvent s'y accrocher bien mieux que sur le sable.

datation de bois fossile qui avait été trouvée à proximité suggère que cette forêt engloutie daterait de quelque 10 000 ans, c'est-à-dire du début de l'Holocène. Le niveau de la mer était alors environ 30 à 35 mètres plus bas (la mer n'a atteint son niveau actuel qu'il y a environ 6 000 ans, avec le réchauffement du climat).

D'après les plongeurs qui les ont observés, les arbres sont disposés comme s'ils avaient été abattus par un tsunami

d'environ cinq mètres de haut. Cette catastrophe aurait parachevé les milliers d'années de conquête du « Doggerland » par la mer du Nord.

Nommée d'après un banc de sable sous-marin, cette immense région occupait l'espace reliant aujourd'hui l'Angleterre aux Pays-Bas, à l'Allemagne et au Danemark. Le changement climatique d'il y a 10 000 ans l'a entièrement fait disparaître.

F. S.

Des chiens si humains

Les propriétaires de chiens l'affirment, la science le confirme : le meilleur ami de l'homme sait reconnaître nos émotions ! Corsin Müller, de l'Université de médecine vétérinaire de Vienne, et ses collègues ont entraîné des chiens en associant une récompense à un visage humain joyeux ou énervé sur des vidéos. Par la suite, les animaux étaient capables de distinguer l'une ou l'autre de ces émotions, même sur des parties de visages qu'ils n'avaient jamais vues.

Drapeaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques convertissent les actions mécaniques en électricité. Une façon de les utiliser serait d'en fixer sur des plaques flexibles qui ondulent grâce au vent, tels des drapeaux. Yifan Xia, de l'École polytechnique, et ses collègues ont optimisé le rendement du système en le connectant à un circuit électrique résonant. Ils ont obtenu une synchronisation du battement du drapeau avec la fréquence de résonance du dispositif électrique, d'où un transfert énergétique optimal.

Biologie animale

Un venin riche en insuline

Les cônes, gastéropodes marins, sont connus pour la diversité des venins qu'ils sécrètent. Il s'agit généralement de neurotoxiques qui s'attaquent au système neuromusculaire de leurs victimes et les paralysent. Le venin est souvent injecté au moyen d'une radula – une sorte de langue munie de dents – modifiée en harpon.

Une autre technique observée est la pêche « au filet ». Le cône dilate de façon exagérée son rostrum, une fausse bouche, qui ressemble alors à un filet de pêche. Or les poissons ne semblent pas se méfier du cône et se laissent avaler. Les chercheurs ont soupçonné

les cônes de diffuser dans l'eau une substance qui provoque un état léthargique chez la proie. Baldomero Olivera, de l'Université de l'Utah, et ses collègues ont découvert que c'est bien la stratégie adoptée par deux espèces de cônes, *Conus geographus* et *Conus tulipa*. Leur cocktail de neurotoxiques contient un ingrédient unique : de l'insuline !

Chez les vertébrés, l'insuline est produite dans les cellules bêta du pancréas. Elle régule la concentration de glucose dans le sang. Ainsi, les personnes atteintes de diabète de type 1 n'ont plus de cellules bêta et ne produisent donc pas d'insuline.

Elles doivent alors s'en injecter pour contrôler leur glycémie. Cependant, un excès d'insuline provoque une hypoglycémie. C'est ce qui arrive à la proie du cône plongée dans un état léthargique.

Il faut aussi noter que les vertébrés et les invertébrés ne synthétisent pas le même type d'insuline pour leur métabolisme. Or la forme particulière utilisée comme poison par *C. geographus* et *C. tulipa* est plus proche de celle des poissons que de celle des gastéropodes, ce qui en assure l'efficacité.

Sean Bailly

H. Safavi-Hemami et al., *PNAS*, en ligne le 20 janvier 2015



Le venin du cône contient de l'insuline qui provoque une hypoglycémie chez la proie. Cette dernière est alors ralentie. Le cône en profite pour l'attraper avec son rostrum étiré.

Vulnérable au stress ?

Nous ne résistons pas tous aussi bien au stress. Johnna Swartz, de l'Université Duke, et ses collègues ont montré que la réactivité de l'amygdale, une plaque tournante des émotions dans le cerveau, est révélatrice de la vulnérabilité de chacun. Les chercheurs ont présenté des visages exprimant la colère ou la frayeur à 750 étudiants, qu'ils ont ensuite suivis pendant quelques années. Plus l'amygdale des sujets s'était activée lors de l'expérience, plus ils avaient eu du mal à gérer les difficultés par la suite.

L'art de ne pas renverser

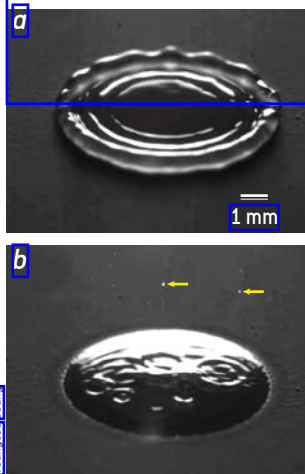
Pourquoi est-il plus facile de se déplacer avec un verre de bière qu'avec un café sans verser de liquide ? Alban Sauret, de l'Unité mixte de recherche 125 CNRS/Saint-Gobain à Aubervilliers, et ses collègues ont étudié l'impact de la mousse dans le ballonnement – le mouvement du liquide quand le récipient est déplacé brusquement ou soumis à une vibration périodique. La mousse a un comportement visqueux sur les parois, ce qui dissipe l'énergie et amortit le mouvement. Un résultat peut-être utile pour réduire le ballonnement dans les camions-citernes ou les navires.

BICEP2 et Planck

En 2014, les physiciens de l'expérience BICEP2 pensaient avoir la preuve de l'existence d'ondes gravitationnelles dans l'Univers primordial. Ce résultat était le fruit d'une analyse du rayonnement du fond diffus cosmologique. Mais pour d'autres chercheurs, la conclusion était erronée car la contribution des poussières galactiques donnant un signal similaire n'avait pas été bien estimée. En mettant en commun leurs données, les équipes du satellite *Planck* et de BICEP2 ont définitivement attribué l'origine du signal aux poussières. Effacées, les ondes primordiales !

Physique

L'odeur de la pluie transportée par des aérosols



Ces images prises avec une caméra ultrarapide montrent une goutte d'eau qui s'écrase sur une surface poreuse (a) et la formation d'aérosols (indiqués par les flèches jaunes, b).

Après une chaude journée, l'averse s'accompagne souvent d'une odeur de terre particulière, nommée *pétrichor* par deux chercheurs australiens en 1964. Mais comment exactement les molécules du sol parviennent-elles à nos narines ? Young Soo Joung et Cullen Buie, de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT) aux États-Unis, ont étudié avec une caméra ultrarapide ce qui se passe quand les gouttes s'écrasent sur un sol poreux.

Lorsqu'une goutte arrive au contact du sol, de petites bulles d'air se retrouvent piégées à l'interface sol-eau. Ces bulles remontent par poussée d'Archimède, puis éclatent en atteignant la surface de la goutte. Elles libèrent alors un jet de fines gouttelettes d'eau : des aérosols.

Par ce processus, des molécules du sol pourraient être emportées, ce qui expliquerait la diffusion du *pétrichor* après l'averse. Les aérosols pourraient aussi entraîner des bactéries et des virus présents dans la terre, et ainsi avoir un effet sur la propagation de maladies ?

En milieu naturel, il est possible que les nombreuses gouttes de l'averse absorbent une grande part des aérosols libérés dans l'air. Les chercheurs doivent encore estimer la part des aérosols qui subsistent. En outre, il reste à évaluer si ces aérosols ont une diffusion locale ou plus étendue et, le cas échéant, s'ils ont un rôle global sur l'environnement.

S. B.

Nature Communications, en ligne le 14 janvier 2015

Insolite

Les dents des patelles, un record de robustesse

Les dents des patelles – des gastéropodes à la coquille conique – seraient constituées du matériau biologique le plus résistant connu à ce jour, d'après l'équipe d'Asa Barber de l'Université de Portsmouth. Ces chercheurs ont étudié la composition des dents au microscope à force atomique : le matériau allie une matrice de chitine souple à des nanofibres de goethite, un minéral riche en fer.



Cosmologie



Énergie sombre : des modèles quasiment éliminés

Des observations astronomiques et des expériences en laboratoire conduisent à des contraintes sévères sur une famille de modèles d'énergie sombre.

L'énergie sombre est l'une des grandes énigmes de la cosmologie moderne. Elle représente près de 70 % de la densité d'énergie de l'Univers et explique l'accélération de l'expansion de ce dernier, mais sa nature est inconnue. Deux expériences, menées l'une par l'équipe de Wim Ubachs, de l'Université libre d'Amsterdam, l'autre par des physiciens de l'Université de Californie à Berkeley et Justin Khoury, de l'Université de Pennsylvanie, permettent d'avancer un peu. Elles imposent de fortes contraintes sur un type de théories imaginées pour rendre compte de l'énergie sombre : les modèles où elle est sous la forme d'un champ scalaire, et en particulier les modèles dits caméléons.

De façon générale, les champs scalaires sont associés à des particules scalaires (c'est-à-dire de spin nul) qui interagissent avec la matière ordinaire et influent sur ses caractéristiques. Une conséquence possible de cette interaction est une variation du rapport des masses du proton et de l'électron au cours de l'histoire de l'Univers. Pour tester cette possibilité, les astrophysiciens mesurent le spectre

électromagnétique émis par de lointains quasars. Leur lumière traverse des nuages de gaz et des galaxies où elle est en partie absorbée en excitant des molécules de dihydrogène. Le spectre est alors marqué par des raies sombres à des fréquences spécifiques liées à cette absorption. La position de ces raies dépend notamment du rapport des masses du proton et de l'électron. Ainsi, en analysant les raies spectrales du quasar lointain J1443+2724, observé en 2004 et en 2013 au VLT, au Chili, Wim Ubachs et ses collègues ont montré que le rapport des masses n'a pas varié depuis 12,4 milliards d'années au moins.

Une deuxième contrainte porte sur les modèles scalaires dits caméléons. Dans ces modèles, le champ interagit avec la matière ordinaire sous la forme d'une cinquième « force » qui dépend de la densité de matière environnante. Si la densité est faible, la force se manifeste à longue portée et explique l'accélération de l'expansion de l'Univers. Si la densité locale est importante, la portée de l'interaction est si petite qu'elle ne serait pratiquement pas mesurable.

En août 2014, Clare Burrage, de l'Université de Nottingham, et ses collègues ont suggéré de tester ce scénario avec des atomes isolés et placés sous vide pour simuler un environnement où la densité est très faible.

L'expérience a été réalisée par Justin Khoury et ses collègues. Ils ont utilisé un interféromètre atomique, avec des atomes de césium sous vide poussé. Une sphère d'aluminium devait annuler la cinquième force sur l'un des deux parcours suivis par les atomes avant d'interférer. Les chercheurs ont montré que la présence ou l'absence de la sphère ne modifie pas l'interférence, et donc que la cinquième force est soit inexistante, soit d'intensité insuffisante pour expliquer l'expansion accélérée de l'Univers.

Ces expériences n'excluent pas définitivement les modèles en question, mais la marge de manœuvre de ces derniers pour expliquer la nature de l'énergie sombre s'est fortement réduite.

Le VLT (Very Large Telescope ou Très grand télescope) de l'Observatoire européen austral est situé au Chili. Pour étudier la lumière des quasars, l'équipe de Wim Ubachs a utilisé le spectrographe ultraviolet et visible UVES (Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph).

S. B.

J. Bagdonaitė et al., Phys. Rev. Lett., vol. 114, 071301, 2015
P. Hamilton et al., 13 février 2015, <http://arxiv.org/abs/1502.03888>

Un rongeur qui fait peur

Pourquoi le lemming norvégien a-t-il des couleurs criardes ? Ces couleurs sont-elles un vestige hérité de ses ancêtres, sans intérêt particulier pour sa survie, ou éloignent-elles les prédateurs en faisant office de panneau « Attention danger ! » ? Malte Andersson, de l'Université de Göteborg en Suède, soutient la seconde hypothèse. En l'étudiant dans la nature, il a montré que le lemming norvégien est plus agressif que le lemming brun commun et moins enclin à se cacher devant une menace.

Pourquoi le corn fait pop

Emmanuel Viot, de l'École polytechnique, et Alexandre Ponomarenko, de l'Université de Grenoble, ont étudié la transformation du maïs en popcorn. Lorsqu'on chauffe le grain de maïs, l'eau qu'il contient bout. À 180 °C, la vapeur crée une pression telle que l'enveloppe se fissure. Cette fracture laisse s'échapper le gaz, créant une forte dépression qui produit une résonance acoustique dans le morceau de popcorn, le « pop ». De cette fissure sort aussi un morceau d'amidon qui propulse le petit bout de maïs, en agissant comme un levier.



© Mathieu Baudry, 2015

Une coccinelle *Coleomegilla maculata* protégeant le cocon d'une larve de guêpe *Dinocampus coccinellae*, sur une feuille de maïs.

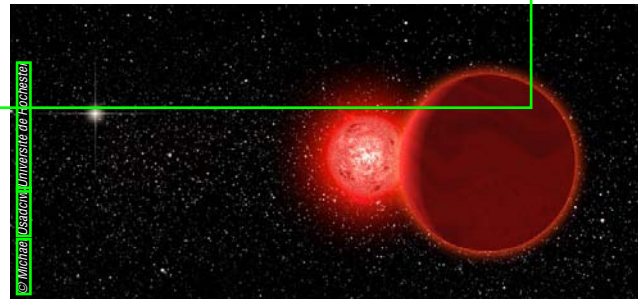
Astrophysique

Un rendez-vous stellaire manqué de peu !

Il y a 70 000 ans, l'« étoile de Scholz » est passée à seulement 0,8 année-lumière du Soleil, d'après l'équipe dirigée par Eric Mamajek, de l'Université de Rochester aux États-Unis. À l'échelle de la Galaxie, cette distance est petite et l'événement rare. En comparaison, l'étoile la plus proche de nous, Proxima du Centaure, est à 4,22 années-lumière et une telle rencontre n'a lieu que tous les 9 millions d'années en moyenne.

L'étoile de Scholz est en réalité un système binaire découvert en 2013 par l'astronome Ralf-Dieter Scholz grâce aux observations du télescope spatial *Wise* (*Wide-field Infrared Survey Explorer*) de la Nasa. Elle est composée d'une étoile naine rouge et d'une naine brune.

C'est en reconstruisant la trajectoire de l'étoile binaire que les astronomes ont découvert quand et à quelle distance avait eu lieu le rendez-vous stellaire. En effet,



L'étoile de Scholz est un système binaire constitué d'une naine brune (en premier plan) et d'une naine rouge (en second plan). Elle a frôlé le Système solaire il y a 70 000 ans.

ce système binaire s'éloigne de nous à grande vitesse (77,6 kilomètres par seconde), mais ne se déplace que très peu latéralement dans le ciel, comme s'il nous fuyait. Les chercheurs ont ainsi montré que l'étoile binaire a frôlé le Soleil et qu'elle a dû traverser le nuage de Oort, un grand réservoir de comètes qui entoure le Système solaire.

D'après Eric Mamajek, le passage de l'étoile aurait peu

perturbé le nuage de Oort, parce qu'il a été rapide et parce que ce système binaire est très peu massif. Mais par le passé, d'autres étoiles plus massives auraient traversé le nuage de Oort en déstabilisant les comètes, une possible explication de certains épisodes de bombardement intense des planètes situées au cœur du Système solaire.

S. B.

E. E. Mamajek et al., *Astrophysical Journal Letters*, vol. 800, L17, 2015

Biologie animale

Une coccinelle manipulée grâce à un virus

Les cas de parasites qui prennent le contrôle du comportement de leur hôte sont fréquents dans la nature. Mais avec la coccinelle *Coleomegilla maculata*, le cas est particulier : lorsque la larve de la guêpe parasitoïde *Dinocampus coccinellae* sort de l'abdomen de la coccinelle parasitée, cette dernière la protège de son corps. Pourtant, le parasite n'est alors plus en contact avec son hôte. Comment dès lors manipule-t-il le comportement de sa victime ?

En comparant le matériel génétique des deux espèces au cours des différentes étapes de leur interaction, Nolwenn Dheilly,

du laboratoire Écologie et évolution des interactions de Perpignan, et ses collègues ont trouvé la réponse. Un troisième acteur intervient : un virus transmis par la guêpe à la coccinelle !

Ce virus s'active quand la guêpe pond un œuf dans l'abdomen de la coccinelle. Il se réplique abondamment pendant le développement de la larve et contamine son hôte. Il agit sur le système nerveux de l'insecte et provoque sa dégénérescence, associée à une certaine paralysie. La coccinelle se retrouve ainsi contrainte à rester au-dessus de la larve qui, entre-temps, s'est extraite de l'abdomen et s'est

construit un cocon entre les pattes de son garde du corps.

La guêpe *D. coccinellae* est le premier organisme parasite connu à ce jour utilisant un virus comme arme biologique pour manipuler le comportement de son hôte. Quant à la coccinelle, après le départ de la larve devenue adulte, elle s'active à son tour : après le malheureux épisode infectieux, ses tissus nerveux se réparent et le virus est éliminé, ce qui lui permet de continuer sa vie. Avec peut-être une légère douleur à l'abdomen ?

Bastien Baudry

N. M. Dheilly et al., *Proc. Roy. Soc. B Biol. Sci.*, en ligne le 11 février 2015

Mathématiques

Des rides hexagonales ou labyrinthiques

La formation de plis sur des surfaces courbes résistait à la modélisation mathématique. Une nouvelle approche a permis de préciser ce qui détermine les motifs observés.

Quand un grain de raisin se dessèche, sa peau se ride. Le même type de sillons sinueux apparaît dans les empreintes digitales, car un processus similaire est à l'œuvre. Ce mécanisme produit aussi des motifs hexagonaux analogues à ceux de la surface d'une balle de golf. Mais de quels paramètres dépend la forme des rides ? Sur des surfaces courbes, ces structures étaient difficiles à étudier. Le mathématicien Jörn Dunkel et son équipe de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT) viennent de franchir une étape.

On explique la formation des plis ou des rides par l'instabilité de flambage. Lorsqu'un matériau est comprimé, il se déforme uniformément dans un premier temps, avant de se plier lorsque la contrainte imposée devient trop importante. Pedro Reis et Denis Terwagne, du MIT, ont étudié l'instabilité de flambage sur un film mince élastique à la surface d'une sphère qu'ils dégonflaient peu à peu. Les rides formaient soit un motif hexagonal, soit un motif de type labyrinthe.

Ils se sont associés aux mathématiciens du MIT pour

comprendre le mécanisme de formation et le processus de sélection des deux motifs.

Walter Koiter, de l'Université de Delft, avait développé une théorie mathématique qui décrit les déformations d'une surface courbe et élastique. Cependant, la résolution de ces équations était trop difficile pour étudier la transition entre les différentes formes de rides – le cas qui intéressait Jörn Dunkel et ses collègues –, en raison d'effets non linéaires importants, liés à la courbure de la surface.

En appliquant des hypothèses simplificatrices validées expérimentalement, les chercheurs ont réduit les équations de Koiter à une seule équation, dite de Swift-Hohenberg, qu'il est possible de résoudre numériquement.

Grâce à cette approche, les chercheurs ont mis en évidence le rôle clé joué, dans la sélection du motif de rides, par la courbure de la surface et l'épaisseur du film élastique. Par exemple, plus une surface est courbée, plus les rides présentent un motif hexagonal régulier. Plus le film élastique

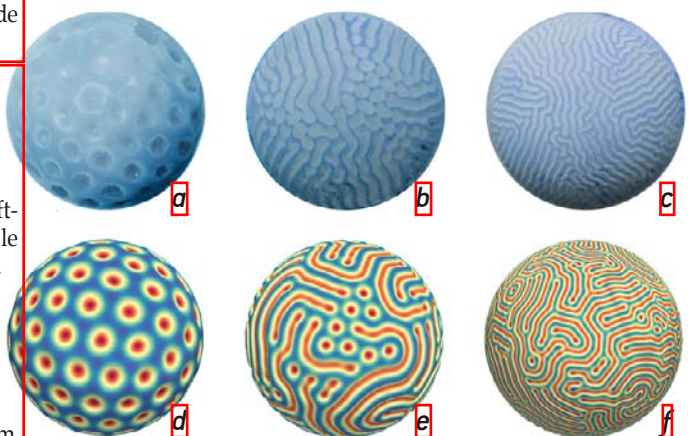
est mince, plus les rides forment des sillons labyrinthiques. Jörn Dunkel et ses collègues ont ainsi quantifié les relations entre ces paramètres et la forme des rides. Ils ont aussi observé une phase intermédiaire dans laquelle cohabitent des structures hexagonales et labyrinthiques.

Les prévisions du modèle sont en accord avec les observations. Le phénomène serait universel et s'appliquerait à

des échelles aussi bien microscopiques que macroscopiques. Il interviendrait sur tout type de surface courbée en compression et expliquerait, entre autres, l'aspect des raisins secs, les empreintes digitales et les circonvolutions du cerveau.

S. B.

N. Stoop et al., *Nature materials*, en ligne le 2 février 2015



En fonction de certains paramètres, la surface d'une sphère en contraction adopte une structure de plis hexagonale (a), labyrinthique (c) ou d'une phase intermédiaire (b). Les simulations du modèle (en bas) correspondent à ce que l'on observe (en haut).

Aux origines des hippopotames

L'analyse génétique établit que les cétacés sont les plus proches cousins des hippopotames. Ce lien était difficile à clarifier, par manque de fossiles des ancêtres des hippopotames. Au Kenya, une équipe franco-kenyane, menée par Fabrice Lihoreau de l'Université de Montpellier 2, a découvert une mâchoire et des dents, datés de 28 millions d'années, d'une nouvelle espèce d'anthracothères. Il s'agit d'une famille disparue et qui comble la lacune entre les hippopotames et leur ancêtre commun avec les cétacés.

L'humanité sature ses mers de plastique

Jenna Jambeck, de l'Université de Géorgie et des collègues ont établi qu'en 2010, entre 1,7 et 4,6 % des rejets de plastiques quotidiens d'une population côtière étaient susceptibles de parvenir en mer. Il s'ensuit que sur les 275 millions de tonnes

de déchets de plastique produites chaque jour dans le monde en 2010, entre 4,8 et 12,7 millions de tonnes ont fini dans les océans. Pour la France, cela signifie que chaque jour, sur les quelque 3303 tonnes de déchets de plastiques produites, entre 56 à 152 tonnes ont gagné la mer.

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



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Comment rendre utiles les débats publics

Les débats publics sur les sciences et les techniques resteront stériles tant qu'un choix réel entre plusieurs options n'y sera pas proposé.

Michel CALLON

Californie, février 1975. À l'appel du biochimiste américain Paul Berg, plus de 150 chercheurs venus du monde entier se réunissent à Asilomar pour un congrès d'un genre nouveau. La question posée est : faut-il encadrer les manipulations génétiques pour éviter qu'elles ne constituent un danger pour l'espèce humaine ? La réponse apportée – contentons-nous de renforcer les règles de sécurité – ne brille pas par son audace, mais le mouvement est lancé. Depuis cette date, de nombreux débats, consacrés aux problèmes posés par les sciences et les techniques, ont été organisés par les scientifiques, mais aussi les pouvoirs publics, des associations, des organisations non gouvernementales (ONG), des entreprises ou des citoyens. Cependant, leurs bienfaits semblent de moins en moins évidents, et des doutes s'élèvent sur leur utilité.

Une majorité de chercheurs estime qu'il est inutile d'ouvrir les dossiers techniques à des groupes – associations, structures de recherches alternatives, citoyens – qui se révèlent incapables d'entrer dans les contenus et qui sont prompts à dénigrer le progrès scientifique et technique. Quant aux citoyens intéressés, ils tendent à considérer que ces débats ne servent à rien, si ce n'est à faire accepter des décisions déjà prises.

Faut-il donc en finir avec les débats publics sur les nanosciences, les déchets radioactifs, les antennes-relais, les biotechnologies, l'environnement, et admettre que les technosciences et leurs effets ne sont

pas discutables ? La solution est tentante, mais chaque jour des problèmes pratiques se rappellent à notre attention. Il y a des déchets radioactifs à gérer, legs des générations passées de décideurs, et dont nous ne savons pas s'il faut les enterrer définitivement ou les conserver à portée de main ; il y a des plantes transgéniques dont certains pensent qu'elles mettent en péril les formes d'agriculture traditionnelles ; il y a le changement climatique qui, on le sait déjà, empoisonnera la vie de nos descendants.

Face à ces problèmes, il ne suffit pas de se demander s'il faut en discuter et avec qui.

COMMENT CRÉER UNE DIVERSITÉ des choix ? En imposant leur réversibilité, la coexistence des options, et des prises de décision mesurées.

Quelques siècles de vie démocratique nous enseignent que des choix doivent exister entre plusieurs options. Si cette diversité des mondes possibles disparaît, alors le débat, même s'il a lieu dans les formes, ne peut être que stérile. Comment créer cette diversité ? L'expérience de ces dernières décennies apporte des éléments de réponse. Trois notions en particulier ont joué un rôle exemplaire dans plusieurs débats : la réversibilité des choix, la coexistence des options et la décision mesurée. Trois dossiers en montrent l'importance : les déchets radioactifs, les organismes génétiquement modifiés (OGM) et le changement climatique.

En misant sur le nucléaire, les générations précédentes se sont peu soucies de l'héritage qu'elles nous laissaient. Elles ont imposé leurs choix sans nous demander notre avis. Devons-nous faire de même avec les générations futures ? Cette question a été au cœur des débats sur les déchets radioactifs organisés lors de la préparation de la loi Bataille, en 1991, et de ceux qui ont suivi. La notion de réversibilité des décisions y a été proposée pour sortir de cette logique.

Une décision sera considérée comme réversible si elle permet de transmettre à la génération suivante une palette d'options au moins équivalente à celle dont nous disposons. La génération suivante pourra alors décider soit de laisser ouvertes ces options et de continuer à les enrichir pour les transmettre à son tour, soit de s'engager définitivement dans l'une d'elles.

La notion de réversibilité a un contenu moral puisqu'elle invite à donner des marges de manœuvre à nos successeurs. Elle exprime également une exigence technique et scientifique. Pendant 30 ans, notre génération doit continuer à explorer la possibilité de l'enfouissement profond tout en investissant dans des activités de recherche et de développement consacrées à d'autres options. Alors nos enfants auront les moyens d'un vrai choix. Ils pourront décider de continuer ou d'arrêter certaines explorations, et, s'ils le désirent, de n'en poursuivre qu'une seule.

Une autre question, au moins aussi importante, est celle du maintien de la diversité des options face aux nombreuses forces qui

tendent à la réduire. Comment assurer que les choix envisageables ne seront pas éliminés avant même que les modalités de leur développement n'aient été éprouvées ? Cette menace n'a rien de théorique. Livrés à eux-mêmes, c'est-à-dire aux puissants intérêts qui les gouvernent, les marchés tendent à privilégier certaines solutions qui deviennent, du fait des investissements consentis, les seules considérées comme rentables et efficaces : le standard VHS s'est imposé pour les magnétoscopes alors que Betamax était le meilleur techniquement ; le clavier QWERTY de même, bien qu'il n'optimise ni la vitesse de frappe ni le confort de travail ; et sans les investissements considérables dont elle a fait l'objet en France, l'énergie nucléaire ne serait pas devenue aussi incontournable pour les décideurs.

C'est sur le dossier des OGM qu'ont été formulés avec le plus de clarté les défis posés à la démocratie par ces mécanismes de sélection et d'élimination. Comment s'assurer, par exemple, que soient conciliées dans le futur deux formes d'agriculture et d'industrie alimentaire, l'une qui recourt aux OGM et l'autre qui repose sur des plantes non modifiées, sachant que les rapports de force économiques tendent à favoriser la première au détriment de la seconde ? La réponse apportée par le législateur tient en une notion – la coexistence – à laquelle il reste à donner un contenu.

Le Haut conseil des biotechnologies a fait des propositions intéressantes sur le sujet. Elles incluent notamment : la mise en place d'expérimentations progressives et de dispositifs d'évaluation de leurs effets sociaux, environnementaux et économiques ; l'organisation de recueils d'informations et leur mise en circulation ; un accès ouvert à la recherche publique pour les différentes options ; la réforme du système de la propriété intellectuelle. Ces formes nouvelles d'organisation, réalistes, éviteraient, si elles étaient adoptées, les mécanismes de verrouillage et préviendraient la disparition des options.

Mais réformer la recherche et les marchés pour entretenir la diversité des options ne suffira pas. Dans les dossiers mis en débat ces 40 dernières années, les décisions et

les choix ne reposent, au moins au début, sur aucune certitude établie. Les réponses passent par des modélisations et des simulations qui mobilisent nombre d'hypothèses pas toujours explicites ni faciles à vérifier. Comment, dans ces conditions, prendre des décisions raisonnables et éclairées et ne pas sombrer dans l'inaction ?

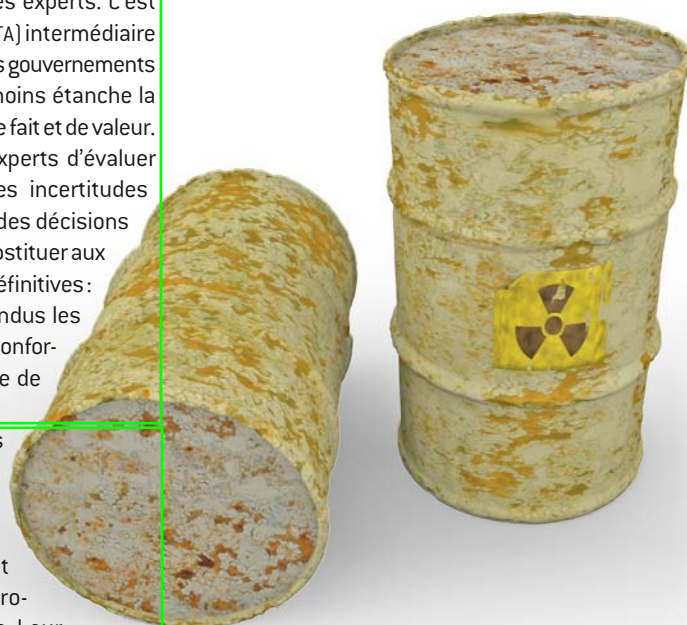
C'est dans le cas du changement climatique, où les incertitudes sont plus fortes et complexes qu'ailleurs, qu'ont été imaginés des dispositifs loin d'être parfaits, mais prometteurs. Des procédures permettent de mieux évaluer la solidité des preuves et la confiance à accorder aux travaux des experts. C'est ainsi qu'une instance (SBSTA) intermédiaire entre les experts (GIEC) et les gouvernements a été créée pour rendre moins étanche la frontière entre questions de fait et de valeur. On demande aussi aux experts d'évaluer leur degré d'accord et les incertitudes non encore levées. Enfin, des décisions mesurées tendent à se substituer aux décisions tranchantes et définitives : à chaque étape sont attendus les retours d'expérience pour conforter les modèles et prendre de nouvelles décisions.

On l'aura compris, les débats restent nécessaires. Mais leur rôle ne doit pas se limiter à l'inventaire des points de vue et à la recherche de compromis souvent introuvables. Leur principale fonction est d'aider à faire émerger les options envisageables et à en accompagner l'exploration. Les illustrations précédentes montrent que la tâche n'est pas impossible. Des solutions sont imaginées. Notre devoir est de les faire connaître, de faciliter leur discussion et leur transposition. Certes elles peuvent paraître utopiques. Pourtant, l'utopie pourrait bien être du côté de ceux qui pensent que la simple recherche d'un consensus suffit à la démocratie. ■

L'AUTEUR



Michel CALLON est chercheur au Centre de sociologie de l'innovation, à MinesParisTech.



QUE FAIRE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES ?

Selon Michel Callon, les débats doivent aider à l'émergence et au développement de différentes options et accompagner l'exploration et l'évaluation de chaque piste, afin de laisser aux générations suivantes la possibilité de choisir.



Réagissez au
Point de vue sur
www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

« L'hygiène lumineuse est essentielle, au même titre que l'hygiène alimentaire »

L'œil ne sert pas qu'à voir. L'intensité lumineuse qu'il reçoit et les moments où cela se produit influent sur notre santé, explique Claude Gronfier, neurobiologiste spécialisé dans l'étude des effets de la lumière sur l'organisme.



Claude GRONFIER est chercheur au sein du Département de chronobiologie de l'unité Inserm 846, à Bron (Lyon).

Tablettes, ordinateurs, télévision, téléphone portable... Les sources de lumière artificielle se sont multipliées dans notre environnement, et l'on s'aperçoit que leur effet sur les rythmes biologiques n'est pas anodin. En 2010, 30 % des adolescents en France présentaient des troubles d'endormissement, selon l'étude HBSC 2010 publiée en 2012 par l'INPES (Institut national de prévention et d'éducation pour la santé), et ceux qui utilisaient un ordinateur, un téléphone portable ou la télévision le soir dormaient 30 à 45 minutes de moins par nuit que la moyenne de leurs camarades. À l'inverse, trop peu de lumière peut être néfaste. Décryptage de Claude Gronfier, auteur de plusieurs travaux sur le sujet.

POUR LA SCIENCE

Comment s'est-on aperçu que la lumière influe sur les rythmes biologiques ?

CLAUDE GRONFIER : On a longtemps pensé que la lumière était surtout nécessaire à la vision. On a ensuite montré qu'elle intervient dans la synthèse de la vitamine D et participe au bien-être. Mais à partir des années 1970, on a découvert qu'il existe une horloge biologique au cœur du cerveau,

impliquée dans la genèse des rythmes biologiques de l'organisme. Si l'on s'endort et se réveille tous les jours à peu près à la même heure, c'est parce que cette horloge permet l'installation du sommeil à certains moments et active la veille à d'autres. On a aussi mis en évidence le rôle clé de la lumière dans ce processus. En 1980 notamment, Charles Czeisler, de la *Harvard Medical School*, et ses collègues ont montré que c'est elle qui remet à l'heure l'horloge biologique, et non des synchroniseurs sociaux, comme on le pensait alors.

PLS

La lumière agit-elle sur l'horloge biologique via les mécanismes de la vision ?

CL. G. : C'est ce qu'on a pensé au départ. On avait admis que la lumière synchronisait l'horloge biologique par l'intermédiaire des cônes et des bâtonnets, cellules photosensibles de la rétine qui transforment les signaux lumineux en influx nerveux. Mais en 2002, on a découvert qu'il existe d'autres récepteurs de lumière dans la rétine, les cellules ganglionnaires à mélanopsine, principales responsables de l'effet de la lumière sur l'horloge biologique. Via ces cellules, la lumière a bien d'autres effets sur le cerveau. Un câblage neuronal les connecte à l'horloge, mais aussi à plusieurs structures cérébrales impliquées dans

la mémoire, le contrôle des émotions, l'humeur, la cognition, la vigilance, le sommeil. Dès qu'une lumière active ces cellules, ces structures sont activées ou inhibées. On se rend compte aujourd'hui que le sommeil de qualité pendant la nuit et la veille de qualité durant le jour sont liés à différents effets de la lumière sur diverses structures cérébrales.

PLS

La lumière artificielle a-t-elle le même effet sur la rétine que la lumière naturelle ?

CL. G. : Cette question suscite beaucoup de recherches. L'homme a évolué à l'extérieur, exposé à la lumière solaire. Il n'est donc pas étonnant que cette lumière soit optimale tant pour la vision que pour activer l'horloge biologique et les autres fonctions cérébrales non visuelles. L'effet des lumières artificielles, en revanche, dépend de leur spectre.

Globalement, elles sont toutes efficaces sur la vision. La lumière solaire paraît blanche parce qu'elle active les trois types de cônes de la rétine, sensibles respectivement au rouge, au bleu et au vert. On peut avoir la même illusion avec des lumières fluorescentes ou des diodes électroluminescentes (LED), même si leur contenu spectral est plus pauvre : il suffit qu'elles contiennent un peu de rouge, de bleu et de vert en bonnes proportions. Certaines, dites chaudes, sont enrichies

en jaune ou en orange, et d'autres, dites froides, sont plus bleutées, telles les LED, mais toutes suffisent à donner une bonne acuité visuelle.

Toutefois, ces lumières peuvent être inadaptées pour activer les fonctions non visuelles, car les cellules ganglionnaires à mélanopsine ne sont pas sensibles aux mêmes longueurs d'onde que les cônes. Les neurobiologistes ont initialement pensé qu'il fallait des intensités lumineuses très fortes pour influencer sur l'horloge biologique : les premières expériences ont vu un effet avec des lumières incandescentes ou fluorescentes de 10 000 lux [l'intensité que l'on perçoit au lever du jour ou au coucher du soleil par un ciel bleu, mais en intérieur, c'est une intensité très forte]. Pourquoi ? Parce que ces lumières étaient pauvres en lumière bleue, qui est celle efficace sur les cellules ganglionnaires.



PLS

Les effets diffèrent-ils d'un type de lumière artificielle à un autre ?

CL. G. : En 2010, une étude de l'équipe de Christian Cajochen, à Bâle, a mis en évidence que toutes les lumières artificielles n'ont pas le même effet sur les fonctions non visuelles. Il a comparé l'effet de lumières fluorescentes classiques de supermarché (ampoules à économie d'énergie), qui produisent une température de couleur de 3 000 kelvins (assez orangée), avec une lumière à 4 000 kelvins, classique dans les bureaux, et une lumière « froide » à 6 000 kelvins. Il a exposé des individus pendant 1h30 à de la lumière entre 21h30 et 23h et mesuré dans leur salive la concentration de mélatonine, une hormone sécrétée de nuit. Il a aussi évalué leurs performances cognitives, leur bien-être et leur vigilance. Il a constaté que plus la lumière est froide, plus elle supprime la sécrétion de mélatonine et augmente les performances cognitives, le bien-être et la vigilance.

PLS

A-t-on obtenu le même effet avec des écrans ?

CL. G. : Oui, en 2012, une étude du même groupe a montré que des écrans d'ordinateur à LED produisent le même résultat, et avec une efficacité supérieure à celle des écrans cathodiques, aux lumières moins froides. Et en décembre 2014, l'équipe de Charles Czeisler a montré que lire le soir sur une tablette pendant trois heures

REGARDER TARD LE SOIR UN ÉCRAN À LED – ordinateur, tablette, télévision – retarde l'endormissement et décale les rythmes biologiques. La lumière bleutée émise active les cellules de la rétine qui contrôlent la synchronisation de notre horloge biologique.

non seulement produit les mêmes effets, mais retarde l'horloge biologique de plus d'une heure par rapport à la lecture d'un livre.

PLS

Une exposition à la lumière artificielle dans la journée peut-elle causer une insomnie dans la nuit suivante ou réduire la durée du sommeil ?

CL. G. : Toutes les études récentes sur les effets non visuels de la lumière ont montré que l'exposition à la lumière dans les quelques heures qui précèdent l'endormissement ont un effet sur la structure interne du sommeil. Non seulement elle le retarde, mais elle modifie sa structure. Par exemple, la lumière bleue allège le sommeil en début de nuit. Ainsi, non seulement on s'endort plus tard (insomnie de début de nuit), mais la qualité du sommeil en début de nuit sera différente et le sommeil sera moins profond.

De plus, on sait maintenant que la qualité du sommeil se construit durant la veille et on pense que l'exposition à la lumière du jour participe à cette construction. Ses mécanismes d'action ne sont pas connus et nous intéressent beaucoup, car si l'on découvre comment moduler la qualité du sommeil par l'exposition à la lumière du jour, on pourra imaginer des applications contre l'insomnie ou les troubles du sommeil.

Noir complet

En l'absence d'une intensité lumineuse suffisante, l'horloge biologique exprime sa propre période, légèrement supérieure à 24 heures en moyenne dans la population, et dérive peu à peu par rapport au jour solaire. C'est ce qui est arrivé à l'explorateur Michel Siffre qui, en 1962, a vécu deux mois dans une grotte et s'est décalé d'une demi-heure par jour. On observe aussi ce décalage chez les personnes aveugles dont la rétine est dysfonctionnelle ou dont les yeux ont été enlevés.

RETARD D'HORLOGE À CONCORDIA

À la station Concordia, en Antarctique, l'hiver dure neuf mois, de février à novembre, et le soleil disparaît début mai pour réapparaître vers le 15 août. Chaque hiver, une équipe reste sur place pour y mener des expériences de climatologie, de glaciologie, de physique. L'équipe de Claude Gronfier a observé un retard d'horloge chez certains hivernants, qui serait dû à leur exposition chronique à une trop faible intensité lumineuse.



C. GRONFIER / UMS 108 - ANTOINE BOUQUET / IFREMER

PLS

Observe-t-on aussi des perturbations quand il n'y a pas assez de lumière ?

CL. G. : Plusieurs études ont décrit un impact de l'exposition chronique à la seule lumière artificielle. Notamment, en juillet dernier, nous avons montré que pendant l'hiver polaire, certaines personnes travaillant à la station Concordia, en Antarctique, présentent un retard de l'horloge biologique, qui se traduit par une durée de sommeil plus courte. À cette période, le Soleil ne se lève pas et les occupants de la station ne sont exposés qu'à des intensités lumineuses de 100 à 150 lux dans la journée, l'équivalent de la lumière allumée dans votre cuisine. De plus, on a observé que lorsque l'éclairage était une lumière blanche artificielle classique, l'horloge avait tendance à prendre du retard, mais que lorsqu'on l'enrichissait en bleu, on évitait ce retard et on gagnait entre 30 et 45 minutes de sommeil par nuit.

PLS

Conseilleriez-vous d'installer des lumières bleues en intérieur pour l'hiver ?

CL. G. : Dans des situations comme à Concordia ou sur certaines plateformes pétrolières exposées à de longs hivers sans accès à la lumière solaire, oui, ces approches iraient dans le bon

sens. Mais faut-il le conseiller dans la vie de tous les jours ? Ce n'est pas évident. Même en hiver et même si l'on ne s'expose pas à la lumière solaire le matin et le soir parce que l'on prend le métro, un accès à la lumière solaire dans la journée ou une fenêtre dans le bureau suffiront en général, et recommander une lumière plus bleue ne sera pas nécessaire.

En revanche, pour certains individus plus sensibles à la diminution de lumière en hiver, par exemple qui souffrent de dépression saisonnière ou de trouble affectif saisonnier, ou pour d'autres qui n'ont pas de trouble affectif, mais qui ressentent une baisse de moral ou des troubles de la vigilance en hiver, alors cela pourrait être une approche intéressante. Mais évidemment, des études devront déterminer si cette hypothèse est valide avant de recommander un complément lumineux.

PLS

Arrive-t-on à évaluer la quantité de lumière nécessaire pour que l'horloge biologique ne se décale pas ?

CL. G. : Non, pas du tout. Ce n'est pas surprenant, car chaque individu a une sensibilité à la lumière qui lui est propre. Pourquoi a-t-on besoin de lumière pour synchroniser son horloge ? Parce que sa période n'est pas exactement

de 24 heures ; la lumière produit le retard ou l'avance nécessaire à sa synchronisation sur cette durée. Un coucher-tard lève-tard extrême a une période endogène de 24 heures et 30 minutes. La lumière corrige sa tendance à se lever 30 minutes plus tard tous les jours ainsi que ses autres fonctions non visuelles. Ses besoins en lumière ne seront pas les mêmes que ceux de quelqu'un dont la période d'horloge est de 24 heures et une minute, par exemple.

D'autre part, la sensibilité à la lumière n'est pas la même chez tous les individus. Elle est influencée par l'âge, le sexe, certaines caractéristiques génétiques et sans doute d'autres choses encore. Les besoins en lumière d'un individu sont donc ceux qui lui permettent d'avoir une horloge biologique bien synchronisée et un sommeil réparateur.

PLS

Quelles recommandations donneriez-vous pour améliorer l'exposition lumineuse ?

CL. G. : La première chose est de faire comprendre que l'hygiène lumineuse est essentielle, au même titre que l'hygiène de sommeil ou l'hygiène alimentaire. La lumière est un stimulus biologique important. Ses effets sur la santé sont maintenant bien établis et ne doivent pas être sous-estimés. Un individu qui a un sommeil, une veille et une humeur de bonne qualité, qui ne se plaint d'aucun trouble, a vraisemblablement une hygiène de lumière adaptée à ses besoins. En revanche, dans certains troubles du sommeil ou affectifs, les thérapies lumineuses sont efficaces, il faut y penser. Quant aux personnes décalées et qui en souffrent – un adolescent qui n'arrive pas à se coucher avant 2h du matin et se plaint d'être épuisé, ou une personne qui sombre à 20h et ne peut profiter d'aucune soirée –, on conseillera à l'un de s'exposer moins à la lumière le soir, de réduire toute son exposition à la lumière, de sortir l'électronique de sa chambre une heure avant le coucher et d'augmenter l'intensité lumineuse le matin, et, à l'autre, d'augmenter l'intensité lumineuse le soir et de la diminuer le matin. Chacun doit rechercher l'exposition lumineuse adéquate pour vivre à l'heure de sa propre horloge... ■

*Propos recueillis
par Marie-Neige CORDONNIER*

**OBSERVEZ LA GRANDE ÉCLIPSE PARTIELLE DE SOLEIL
EN TOUTE SÉCURITÉ**

AVEC LES LUNETTES « SPÉCIALES ÉCLIPSE » !

le 20 mars 2015 à 10h29 m

Temps légal du maximum pour Paris

3 €

(Tarif dégressif
selon quantité)



Lunettes de protection certifiées CE pour regarder le Soleil à l'œil nu en toute sécurité. Equipées de filtres en polymère teinté dans la masse et haute protection (transmission 1/100000 ème, densité 5), ces lunettes sont parfaites pour regarder les éclipses solaires, passages de planètes devant le disque solaire, ou taches solaires de tailles importantes...

Prix dégressif par lots: 1x - 5x - 10x - 50x - 100x - 500x et 1000x (pour d'autres quantités, consultez-nous).

Caractéristiques:

- Lunettes répondant aux Normes C.E.
- Filtres en polymère teinté dans la masse
- Carton extra, panneau sandwich

**INSTRUMENTS ASTRONOMIQUES - JUMELLES - LONGUES-VUES - MICROSCOPES
LOUPES - BASSE-VISION - MÉTÉO - LIBRAIRIE - GLOBES - GADGETS - POSTERS**



la maison de
l'Astronomie
<http://maison-astronomie.com>

33 et 35, rue de Rivoli, 75004 Paris
Tel. : 01 42 77 99 55
info@maison-astronomie.com
horaires d'ouverture :
du mardi au samedi de 10h15 à 18h30

Le cœur délaissé de la science

par Richard Taillet, sur *Signal sur bruit*

L'essentiel de l'information scientifique à laquelle nous sommes exposés, en tant que citoyens, porte sur des découvertes, sur des « avancées ». Si l'on parvenait à représenter la connaissance scientifique sur une carte, ces découvertes et avancées seraient symbolisées par la progression des frontières de la science sur des territoires vierges et hostiles.

Les médias consacrent d'importants moyens à nous informer sur ces frontières mouvantes. Étant souvent amené à rencontrer le grand public, j'en constate régulièrement les effets : « Vous avez vu, ils ont dit à la télé qu'on avait découvert une nouvelle planète à x années-lumière de la Terre » ou « Alors comme ça, il paraît que finalement, il n'y a pas eu de Big Bang ? » d'un air un peu accusateur, sur le ton de « Il faudrait savoir ce que vous voulez, à la fin ! » (la question se déchiffre généralement en « Un communiqué de presse a annoncé qu'une équipe de chercheurs a fait une observation en désaccord avec certains points du modèle cosmologique standard. »).

Je suis à chaque fois surpris de constater l'immense décalage entre ce qui intéresse grand nombre de gens qui viennent à la rencontre des scientifiques, et ce qui moi me passionne. Autant que ses frontières, c'est le cœur du pays « science » qui me surprend, m'émerveille et me donne envie de partager ce sentiment. Ses régions centrales – les bases de la mécanique, de l'optique, de la thermodynamique, etc. –, certes explorées et défrichées depuis longtemps, sont au moins tout aussi belles que ses frontières nouvellement repoussées.

Des phénomènes que l'on comprend depuis longtemps, comme les interférences lumineuses ou la diffraction des ondes, cachent des richesses fabuleuses et réservent parfois de belles surprises. Le fait que l'on puisse décrire la lumière grâce à quatre équations qui tiennent sur un *post-it*

est époustoufflant. Enfin, c'est la familiarité avec ces concepts qui permet d'apprécier les progrès des différents domaines de la physique et de les mettre en perspective.

Or c'est devant la théorie des cordes ou les trous noirs que le grand public s'émerveille le plus. Pourquoi cet engouement devant ces objets théoriques ? Il est impossible de



La série *Fringe* explore les frontières de la science, mais les termes utilisés montrent que le réalisateur n'a pas compris les concepts scientifiques bien établis.

faire une conférence sur l'astrophysique ou sur la cosmologie sans avoir LA question : « Ça n'a rien à voir avec ce dont vous avez parlé, mais puisque vous êtes de la partie, pouvez-vous nous expliquer en deux mots ce que c'est, un trou noir ? ».

Personne ne demande « Au fait, c'est quoi les interférences lumineuses ? » à la fin d'une conférence sur l'optique (qui attire systématiquement moins de monde). Et pourtant, quand on y songe, obtenir de l'obscurité en envoyant de la lumière sur de la lumière, c'est très étonnant !

Autre illustration frappante : le réalisateur américain J. J. Abrams a consacré une série entière, *Fringe*, à cette frontière de la science. Plusieurs épisodes s'appuient sur des

phénomènes qui dépasseraient la « science connue » (joli pléonasme) et demanderaient de nouvelles théories. Le vocabulaire employé montre pourtant que le réalisateur n'a pas du tout compris la science connue, et surtout qu'il ne s'y intéresse absolument pas ! Exercice pour la prochaine fois : (re)regarder toute la série, traquer les utilisations des mots *champ magnétique* et *électromagnétisme*, tenter de faire le lien avec la physique du XIX^e siècle à laquelle ces concepts peuvent être rattachés...

Tentons une explication : les sujets-frontières, tels la théorie des cordes, sont extrêmement complexes et subtils, et il est hors de question d'entrer dans le moindre détail technique pour les présenter au grand public. Peu de chercheurs, et encore moins de journalistes scientifiques, comprennent la théorie des cordes et sont capables de l'expliquer (je n'ai moi-même pas la chance d'en faire partie). On en présente du coup une description très imagée, avec des analogies simples. Paradoxalement, de tels sujets deviennent alors plus faciles à aborder, le degré de rigueur étant d'avance fixé très bas. On aura facilement l'impression d'avoir compris quelque chose à la théorie des cordes, mais c'est une illusion.

Le cœur de la science est-il condamné à être enseigné plutôt que vulgarisé ? C'est probablement la question de la culture scientifique qui se pose ici. ■



Richard TAILLET est professeur à l'Université Savoie Mont Blanc et chercheur au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique (LAPTh). Il est l'auteur du blog *Signal sur bruit* (www.scilogs.fr/signal-sur-bruit).



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

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE DE L'ACTUALITÉ SCIENTIFIQUE

POUR 1€* !



www.pourlascience.fr/testerlemagazine

*Offre spéciale incluant le 1er numéro au prix de 1 € puis les suivants au prix de 4,66 € par mois. Offre d'abonnement réservée aux nouveaux abonnés, sans engagement de durée et résiliable sur simple demande auprès de notre service abonnement.

Grossesse nerveuse : un père sur cinq concerné

Cerveau & Psycho

TESTEZ

vos formes
d'intelligences
(adultes + enfants)

page 40

Les neurosciences ont découvert

8 intelligences

ont découvert

Quelle est la vôtre ?



France métr.: 6,95 €, All.: 10 €, Bel.: 8,50 €, Can.: 11,90\$, Grèce: 8,50 €, Guad.: 8,25 €, Guy.: 8,25 €, Lux.: 8,50 €, Mart.: 90 MAD, Mex.: 8,25 €, N. Cal.: 1170cfr, Port. Cont.: 8,25 €, Réun.: 8,25 €, Suisse: 15fr

Le cannibalisme sexuel, un instinct dévorant

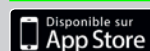
Peut-on vaincre sa peur des maths ?

Bibliothérapie :
des livres
qui guérissent

n°68 - Bimestriel mars-avril 2015

11°68' - 96 pages - prix de vente : 6,95 €

Feuilletez les premières pages sur
www.cerveauetpsycho.fr

**Disponible sur**

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Pourquoi les informaticiens rêvent d'immortalité

L'indépendance des objets informatiques vis-à-vis de leur support matériel soutient le fantasme d'une vie éternelle.



Cela fait bientôt quatre mille ans que nous lisons *L'Épopée de Gilgamesh* et nous devrions donc avoir compris que les dieux nous ont imposé la mort comme la vie, et qu'il n'est de ce fait pas dans la nature de l'homme d'être immortel. Pourtant, le rêve de concevoir des robots-médicaments qui réparent le corps en permanence ou celui, plus ancien, de transférer l'esprit d'un être humain sur un support moins altérable que son cerveau semblent raviver cette flamme mal éteinte du désir d'échapper à la mort.

Certains se moquent de la puérité de ces projets, d'autres en sont scandalisés. Mais essayons ici de comprendre pourquoi ceux qui ressuscitent ce désir d'échapper à la mort sont souvent des informaticiens. Quelles sont les idées qui, dans l'informatique, font naître ce déraisonnable espoir d'une vie sans fin ?

Une première idée est celle d'indépendance du logiciel par rapport au matériel, à savoir qu'un même programme peut être utilisé sur des ordinateurs différents, être transféré d'un ordinateur à un autre, y compris au cours de son exécution, et fonctionner encore longtemps après que l'ordinateur sur lequel il a été développé a été mis au rebut. L'informatique renoue ainsi avec la philosophie de l'idéalisme – non pas avec la thèse que l'esprit existe hors de la matière, mais avec celle que, même si l'esprit est toujours incarné dans la matière, la façon dont il l'est est, au bout du compte, secondaire. De cette

idée d'indépendance du logiciel par rapport au matériel à celle de transfert de l'esprit d'un être humain sur un autre support que son cerveau, il n'y a qu'un pas.

Une deuxième idée est la plasticité des objets informatiques. Le succès du réseau Internet, par exemple, s'explique par le fait qu'il a été conçu pour continuer à fonctionner même quand on lui ajoute

L'idée d'un réseau éternel, car sans cesse réparé, mène directement à celle d'un corps immortel, qui serait lui aussi sans cesse réparé

ou retire des ordinateurs. Ainsi, ce réseau fonctionne depuis bientôt 50 ans même si aucun de ses ordinateurs initiaux n'est encore en état de marche. Et nous n'avons aucune raison de penser qu'Internet disparaîsse un jour, car, tant que nous voudrions le garder en état de marche, il suffira, à chaque fois qu'un ordinateur tombera en panne, de le remplacer par un autre.

En informatique, un couteau dont on change successivement la lame et le manche reste le même objet, car son identité est assurée par la continuité de sa fonction. Cette idée d'un réseau éternel, car sans cesse réparé, mène directement à celle d'un corps immortel qui serait, similairement, sans cesse réparé.

Au-delà de ces deux idées, il est possible que le fol espoir d'une vie éternelle ait son origine dans une transformation plus profonde de notre culture, portée par l'informatique, à savoir que la complexité ne nous fait plus peur. Un poste de radio comportait rarement plus de quelques dizaines de composants; une locomotive à vapeur, rarement plus de quelques milliers; mais les ordinateurs sont souvent constitués de plusieurs milliards de transistors, les programmes de centaines de millions de lignes et les données manipulées par ces programmes, de millions de milliards de bits. Ces objets permettent à leur tour de fabriquer des objets très complexes, par exemple des démonstrations mathématiques de centaines de millions de pages. De ce fait, simuler, transférer ou réparer un corps composé de quelque 10^{15} à 10^{17} cellules ne semble plus si inconcevable.

Comme souvent, les utopies sont moins intéressantes pour ce qu'elles promettent que pour ce qu'elles révèlent. Les nouveaux rêves d'une vie sans fin nous montrent à quel point notre rapport à la complexité a changé. Et aussi que, quoi qu'en dise *L'Épopée de Gilgamesh*, la vie éternelle n'est peut-être pas aussi impossible que le sont, par exemple, la quadrature du cercle ou le mouvement perpétuel. ■

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

Radicalisation djihadiste : attention aux probabilités

Le site Internet mis en place par le gouvernement risque d'être submergé de fausses alertes de radicalisation.

La séduction exercée par la radicalisation djihadiste sur certains jeunes esprits est un objet d'inquiétude légitime. Le gouvernement français a pris à ce sujet une initiative remarquée en proposant le site www.stop-djihadisme.gouv.fr. Les parents peuvent y trouver une liste de signes pré-curseurs possibles de la radicalisation de leurs enfants : arrêter de faire du sport, passer du temps sur Internet, changer ses habitudes vestimentaires ou alimentaires, etc. Que l'on n'interprète pas cette chronique comme une critique de cette utile initiative, mais il me semble qu'un point, un classique de la psychologie cognitive de l'erreur, n'a pas été relevé.

On a ainsi une sorte de test : y a-t-il des risques qu'un individu soit en cours de radicalisation sachant qu'il présente tel ou tel signe ? Comme on le sait, notamment en médecine, la plupart des tests ne sont pas fiables à 100 %. Supposons, et c'est assez généreux compte tenu de l'ambiguïté des signes avant-coureurs signalés, que le test de fanatisation ait 95 % de fiabilité. On entend par là que dans 95 % des cas, un esprit qui se radicalise manifeste ces signes annonciateurs.

Pour établir ce test, on a sans doute analysé la trajectoire d'un nombre n d'individus qui ont été tentés par le djihad et établi, sur cette base, une nosographie de la fanatisation. Il n'y aurait pas grand-chose à dire sur la procédure si elle ne se heurtait au biais de négligence des taux de base

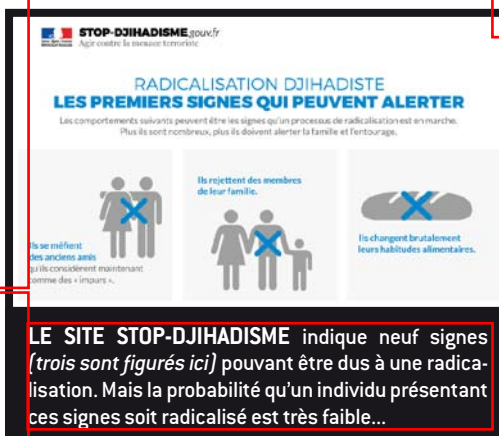
— la tendance que nous avons d'oublier la fréquence d'occurrence d'un événement dans nos évaluations probabilistes.

Prenons un exemple pour comprendre. Supposons qu'une maladie touche une personne sur 1 000 et qu'elle soit détectée par un test fiable à 95 %, c'est-à-dire dont le taux d'erreurs positives est de 5 % — autrement

$100/(100 + 4995) = 100/5095 \approx 0,02$ montre que la probabilité qu'un individu détecté positif soit réellement porteur de la maladie n'est que de 2 %. Ce qui rend ce résultat si contre-intuitif, c'est notre incapacité à intégrer spontanément dans notre calcul la fréquence de la maladie dans la population globale : nous la traitons comme une donnée indépendante du problème, ce qui n'est pas le cas.

De la même façon, les individus qui se radicalisent dans une population sont heureusement très rares (même si leur visibilité sociale nous les fait facilement voir comme plus nombreux qu'ils ne sont en réalité). S'il est difficile d'établir le poids de cette radicalisation dans la jeunesse, on est certain qu'elle est très minoritaire (il y a plus de 20 millions d'individus âgés de moins de 25 ans en France, dont quelques milliers tout au plus se sont radicalisés).

Dans ces conditions, même si l'on admet que le test établi par le site ministériel est plutôt fiable, la probabilité que la présence de ces signes indique une authentique fanatisation est infime. Voilà pourquoi l'un des défis que représente cette radicalisation possible de la jeunesse est celui du traitement de la montagne de signalements inutiles qui risquent de se déverser sur le ministère. ■



dit, il y a 5 % de faux positifs. Un individu est positif au test. Quelle est la probabilité qu'il soit effectivement atteint par cette maladie ?

Même les médecins se trompent lorsqu'ils ont à évaluer ce genre de situations. La plupart répondent « 95 % » à la question posée*. Or la bonne réponse est... 2 % ! En effet, « 5 % de faux positifs » signifie que sur 100 non-malades, cinq sont positifs au test. Or sur une population de 100 000 habitants, il y a 99 900 non-malades, donc 4 995 faux positifs. Et pour cette même population, il n'y a que 100 vrais malades. Le calcul simple

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

*W. Casscells et al., *N. Engl. J. Med.*, vol. 299(18), pp. 999-1001, 1978



THÉÂTRE LA REINE BLANCHE

2 BIS PASSAGE RUELLÉ
75 018 PARIS

M^o LA CHAPELLE/MARX DORMOY
RÉSERVATIONS : 01 40 05 06 96
WWW.REINEBLANCHE.COM

17 MAI

CASSER EN S'AMUSANT !

MATTEO CICCOTTI
(ESPCI),
LAURENT PONSON
(CNRS/UPMC),
ELISABETH BOUCHAUD
(ESPCI & CEA)

31 MAI

FORME, TEXTURE, MATIÈRE - QUAND PHYSIQUE ET ART SE RENCONTRENT

LUDOVIC PAUCHARD
(CNRS/UPSUD),
CÉLINE NADAL
(MUSÉES DE TROYES)

21 JUIN

LES INVENTIONS QUI ONT PRESQUE MARCHÉ

YVES BRÉCHET
(CEA & INPG),
NAÏS COQ

1^{ER} FÉVRIER

L'UNIVERS A-T-IL JAMAIS COMMENCÉ... ?

ÉTIENNE KLEIN
(CEA)

8 MARS

N'EST PAS MACHINE QUI VEUT.

ALAIN PROCHIANTZ
(COLLÈGE DE FRANCE)

12 AVRIL

JE CHERCHE...

SÉBASTIEN BALIBAR
(ENS PARIS),
MICHEL ALBERGANTI
(FRANCE CULTURE),
MARGOT SEGRETO
(CIE LA PEAU DE L'OURS)

SCÈNES
DE SCIENCE
LE DIMANCHE À 11H

Les routes de 5^e génération

Nicolas Hautière, Chantal de La Roche et Jean-Michel Piau

Économes en matériaux et en main-d'œuvre, non polluantes, productrices d'électricité, automatisées, sûres, etc. : les routes de demain devront répondre à des exigences nouvelles et nombreuses. Voici comment.



L'ESSENTIEL

■ **Les routes de demain** sont confrontées à trois grands enjeux : le développement durable, la transition énergétique et la mobilité.

■ **Les revêtements** et les chaussées seront conçus de façon à économiser matériaux, énergie et main-d'œuvre.

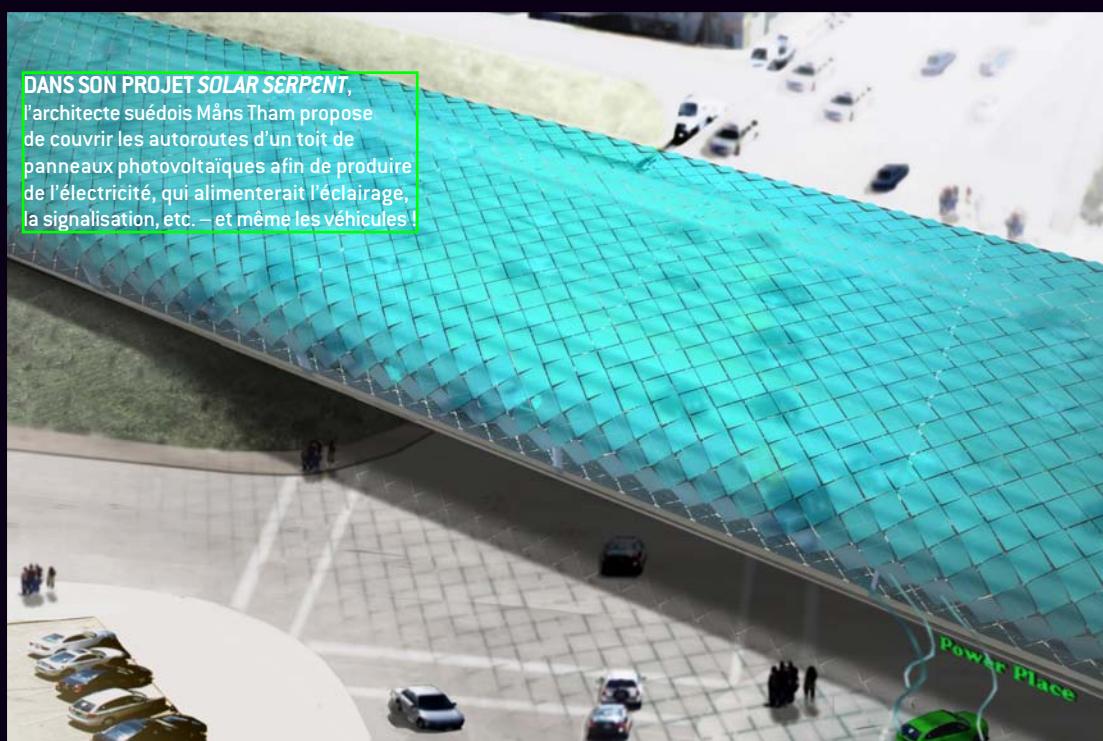
■ **À l'aide de panneaux photovoltaïques**, les routes produiront elles-mêmes l'énergie nécessaire à l'éclairage, la signalisation ou la recharge des véhicules.

■ **Des systèmes de gestion et d'information automatisés** joueront un rôle essentiel.

Mans Thom Architects & Urban Strategists www.mansthom.com



DANS SON PROJET SOLAR SERPENT, l'architecte suédois Mans Thom propose de couvrir les autoroutes d'un toit de panneaux photovoltaïques afin de produire de l'électricité, qui alimenterait l'éclairage, la signalisation, etc. — et même les véhicules !



Après le chemin muletier, la voie romaine, le macadam puis l'autoroute, voici venu le temps des routes de cinquième génération. Dans un avenir plus ou moins proche, celles-ci intégreront diverses évolutions techniques et multiplieront les interactions entre véhicules et infrastructures afin de mieux répondre aux enjeux du développement durable, de la transition énergétique et de la mobilité.

Les routes d'aujourd'hui résultent d'une évolution plus que bimillénaire. Conçues initialement pour les cavaliers, elles se sont revêtues de pavés pour permettre aux services de poste et à l'armée de parcourir plus rapidement l'ensemble de l'Empire romain. Au début du XX^e siècle, avec l'essor du trafic automobile, mais aussi avec le développement de la bicyclette, les chaussées, constituées de gros cailloux tassés au rouleau compresseur, ont été revêtues de goudron, de pavés bitumineux ou d'asphalte, comme

c'était déjà le cas pour les trottoirs dès le début du XIX^e siècle. Mais l'automobile continuait à utiliser les chemins et axes de transports des chevaux et hippomobiles, selon des tracés qui n'avaient pas été créés pour elle. C'est l'autoroute qui allait, au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, répondre aux besoins des voitures et des poids-lourds, tant du point de vue de la vitesse que de la sécurité.

Trois enjeux majeurs

Ainsi, les routes sont vouées à se rénover en permanence, à assurer de nouvelles fonctions. Elles sont confrontées aujourd'hui à trois enjeux majeurs. Le premier est celui du développement durable, idée que l'on résume en « un développement qui répond au besoin du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Le deuxième enjeu est celui de

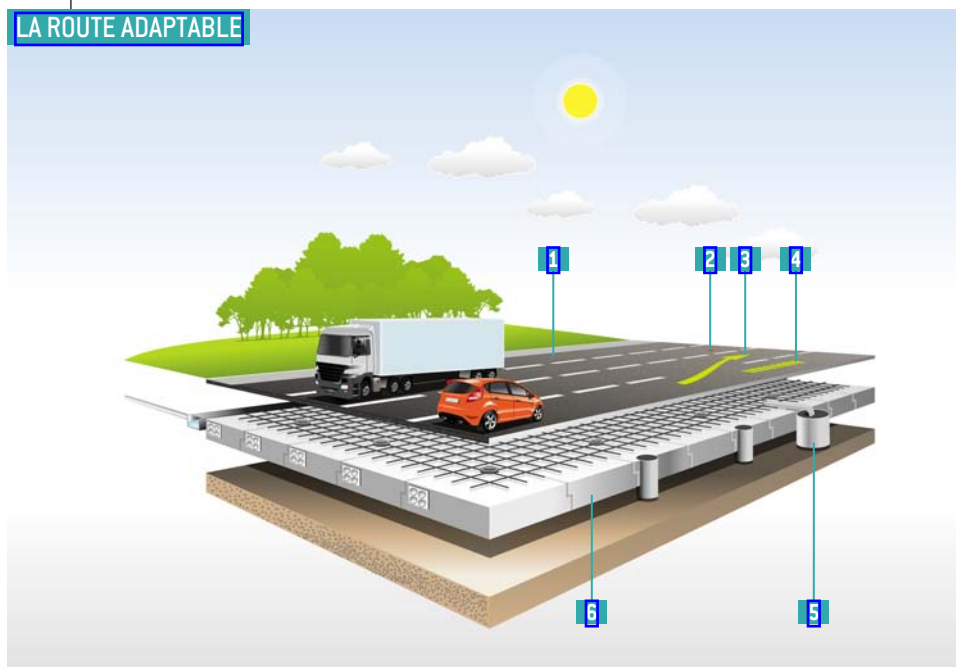
la transition énergétique, le passage du modèle énergétique actuel, fondé à 80 % sur les énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon), à un nouveau modèle où domineront les énergies non carbonées (nucléaire et renouvelables). Enfin, le troisième enjeu est celui de la mobilité, qui conditionne le développement économique et social dans un monde de plus en plus connecté.

Ces enjeux nécessitent de repenser le transport routier, qui assure dans les pays développés plus de 80 % des flux de passagers et de marchandises, tout en consommant 60 % de l'énergie fossile produite sur Terre et en étant responsable de 25 % des émissions de gaz à effet de serre.

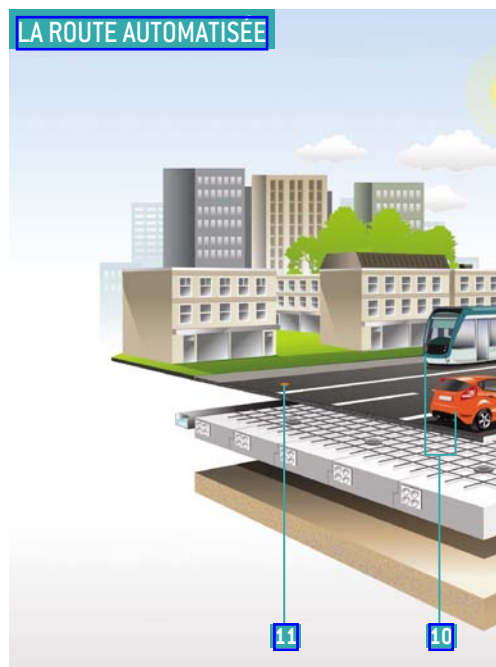
Cela appelle sans doute de nouvelles sources d'énergie pour les véhicules, mais aussi un nouvel art de construction des routes, afin de diminuer les nuisances, améliorer les conditions de mobilité et le cadre de vie dans les villes et les campagnes.

DES ROUTES ADAPTABLES, AUTOMATISÉES

LA ROUTE ADAPTABLE



LA ROUTE AUTOMATISÉE



Le Forum européen des laboratoires nationaux de recherche routière (FEHRL, pour *Forum of European National Highway Research Laboratories*) a été créé en 1989 et représente plus de 30 instituts et laboratoires, dont l'Ifsttar en France. Son programme phare, intitulé *Forever Open Road* et lancé en 2011, porte sur les routes de cinquième génération. Il s'articule autour de trois axes, « La route adaptable », « La route automatisée » et « La route résiliente » [aux

aléas climatiques]. Ces schémas résument les principales idées et techniques visées.

1 Revêtement écologique, autoréparable, poreux, silencieux, réfléchissant de nuit. 2 Capteurs intégrés à la voie pour le suivi et le contrôle du trafic. 3 Guidage modulable des véhicules. 4 Système intégré de recharge des véhicules électriques. 5 Recueil d'énergie solaire et alimentation pour éclairage, signalisation et capteurs.

Il faut le souligner, les choix en la matière sont en grande partie politiques. Mais ils dépendent aussi des technologies disponibles. Aussi, de leur côté, ingénieurs et chercheurs développent et testent des techniques susceptibles de bénéficier aux routes du futur, au sein de scénarios généraux guidés par les trois grands enjeux mentionnés. Passons en revue un certain nombre de ces innovations, qui donneront une idée plus concrète de ce que seront les routes d'ici 10, 20 ou 30 ans.

Un premier aspect porte sur les procédés de construction de chaussées. De façon générale, il s'agit d'économiser les ressources naturelles, en construisant des routes à partir de matériaux plus endurants au trafic et au climat, et cela avec des techniques compatibles avec le développement durable.

Pour économiser les ressources naturelles, une stratégie consiste à recycler les matériaux en place ou à employer, seuls

ou en supplément de matériaux neufs, des matériaux granulaires de diverses sources locales (mâchefers, pneus usagés, matériaux de déconstruction, coproduits industriels, etc.).

L'utilisation de ressources locales permet en outre de limiter les transports de matériaux liés aux chantiers routiers eux-mêmes, et ainsi de diminuer le coût énergétique des chantiers, dû en grande partie au transport des matériaux.

Pour les liants, une première idée consistait à remplacer les liants bitumineux, issus de la distillation des pétroles bruts, par des liants issus de matières végétales (celles utilisées pour fabriquer des biocarburants par exemple). Elle s'est vite heurtée à la réalité de la disponibilité des ressources et de la compétition avec la production alimentaire. S'il n'est donc pas concevable de remplacer la totalité du bitume par ce type de liants, d'autres pistes sont à l'étude, par

LES AUTEURS



Nicolas HAUTIERE est directeur de projet au département Composants et systèmes

de l'Ifsttar, à Marne-la-Vallée.

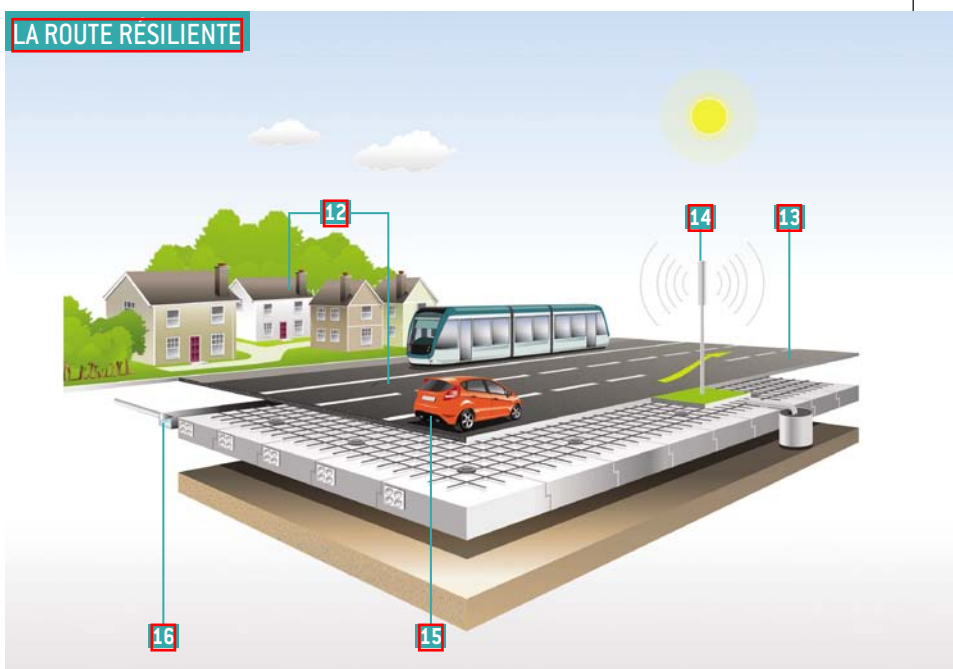
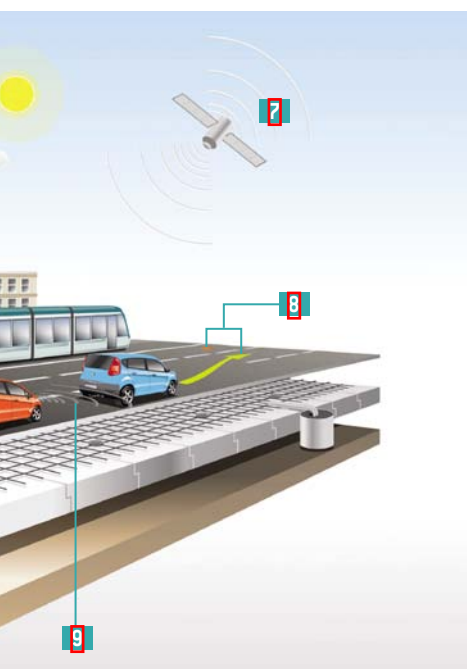


Chantal DE LA ROCHE est responsable de projet Route de 5^e génération à l'Ifsttar, à Nantes.



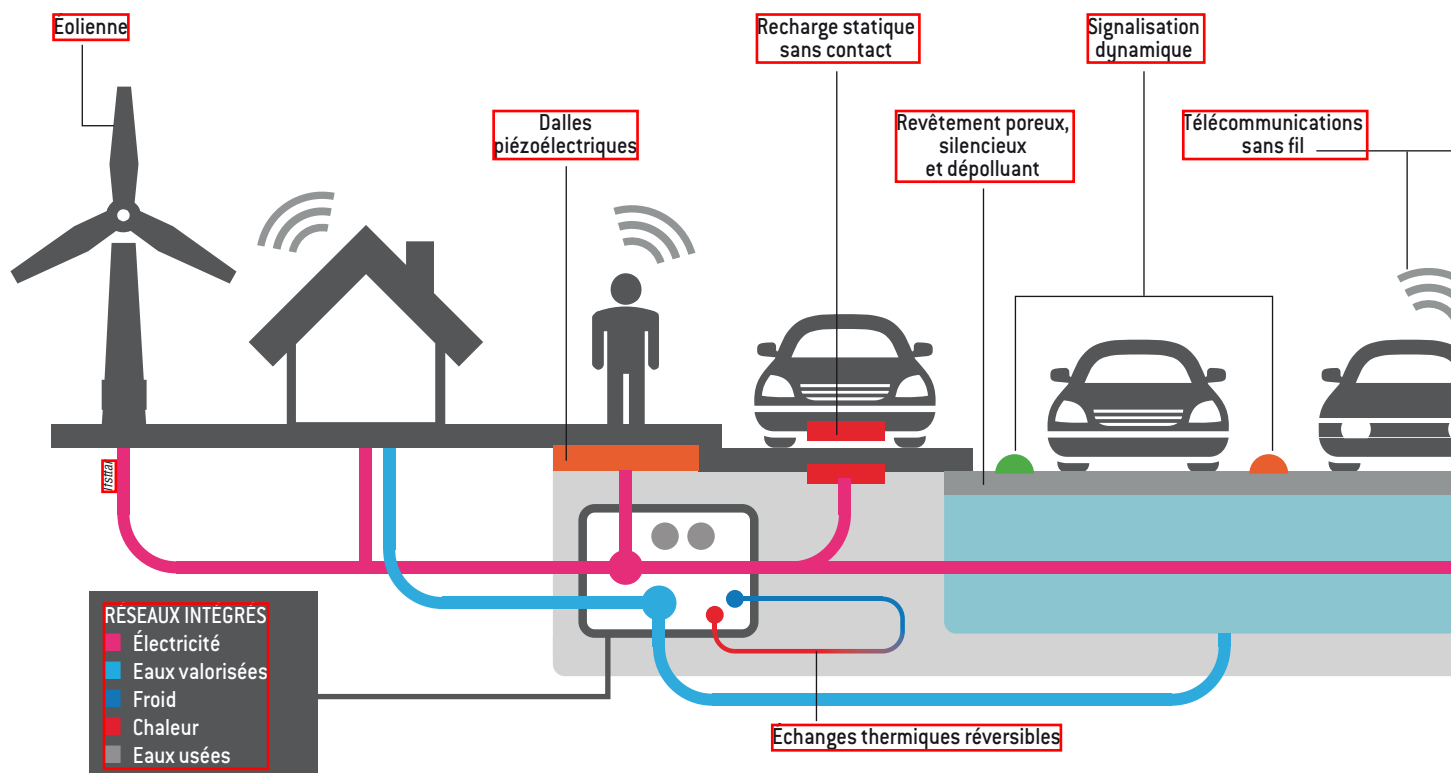
Jean-Michel PIAU est chercheur au laboratoire LAMES de l'Ifsttar, au centre de Nantes.

ET RÉSILIENTES AUX ALÉAS CLIMATIQUES



6 Eléments préfabriqués intégrant des réseaux de drainage, de communication et d'électricité. **7** Système de communication entre les infrastructures routières, les conducteurs et le réseau de contrôle. **8** Systèmes de guidage lumineux en fonction du trafic et des exigences du réseau routier. **9** Aide au regroupement de véhicules. **10** Capteurs embarqués pour localisation du véhicule et de ses voisins, gestion d'incidents, etc. **11** Capteurs intégrés pour le

contrôle du trafic, le suivi des conditions météorologiques et de la pollution. **12** Échanges de chaleur chaussée-bâti pour faire face à des événements météorologiques extrêmes. **13** Système intégré de déverglaçage. **14** Contrôle du trafic réactif aux conditions météorologiques, communication des prévisions météo en temps réel. **15** Système embarqué d'information météorologique. **16** Système de drainage et de réservoirs, en prévision de tempêtes.



REGROUPEUR DE MULTIPLES TECHNIQUES
est nécessaire pour réaliser un espace routier de cinquième génération. Une telle intégration permettrait de satisfaire les exigences matérielles, énergétiques, environnementales et informationnelles des infrastructures routières de demain.

exemple l'emploi de ces liants végétaux en petite quantité pour régénérer le bitume ancien lors des opérations de recyclage, ou bien la mise au point de liants alternatifs issus de biomasses non alimentaires. On peut notamment citer les liants à base de micro-algues, qui font l'objet du projet *Algoroute* porté par plusieurs organismes français, dont l'Ifsttar (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux).

Par ailleurs, on cherche à augmenter les taux actuels de recyclage des matériaux pour chaussées, qui atteignent généralement 10 à 30 % par rapport aux matériaux neufs. Cela exige à la fois de meilleurs procédés de tri, une meilleure prise en compte des cycles de vie des matériaux et la mise au point de méthodes d'étude permettant d'évaluer et d'optimiser le comportement des matériaux recyclés. Il s'agit aussi de développer des outils industriels permettant de réchauffer le matériau bitumineux ancien afin de pouvoir le malaxer et le mettre en œuvre sans altérer définitivement les propriétés du liant.

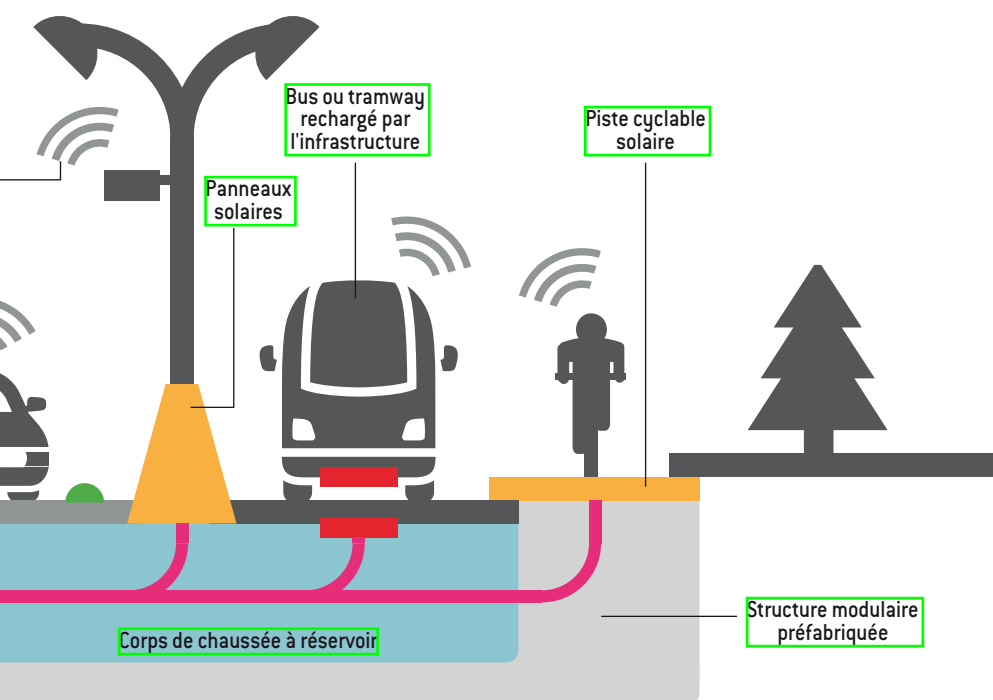
Certaines techniques de recyclage se révèlent, à l'usage, vertueuses à plusieurs

titres. À l'Ifsttar, nous avons ainsi récemment montré que l'exposition à l'air libre des bétons de déconstruction avant réemploi permet de piéger une partie du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique, ce qui contribuerait à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Un autre exemple est l'incorporation de granulats de caoutchouc, obtenus par broyage de pneus usagés, aux couches superficielles des chaussées : ce recyclage de matériau conduit du même coup à une diminution du bruit de trafic.

Des matériaux plus résistants

Afin d'économiser les matériaux, une autre approche est de mettre au point des matériaux très résistants à la circulation et aux agressions climatiques, qui laissent envisager des routes dites perpétuelles, à longue durée de vie.

Un exemple de cette démarche est représenté par les enrobés à base de résine époxy, déjà employés comme revêtements sur les tabliers de ponts en acier ou en zones de virage sur autoroute. Plus récemment, l'Ifsttar a développé, dans le cadre



d'un projet de recherche européen, un revêtement de chaussée à base de béton de ciment qui garantit des propriétés de surface (adhérence, étanchéité, etc.) sur une durée de l'ordre de 30 ans au lieu de 10 actuellement. Bien que trois fois plus coûteux, un tel revêtement permet d'espacer les opérations de maintenance, à l'origine de nombreux retards et gênes chez les usagers ou les riverains.

Une approche alternative consiste à mettre au point des matériaux autoréparables. L'une des techniques explorées est d'inclure dans le revêtement des microcapsules de bitume frais. Sous le poids des charges roulantes, en particulier des poids-lourds, ces microcapsules éclatent peu à peu, libérant ainsi le bitume et rajeunissant le matériau, qui conserve alors sa souplesse.

Pour augmenter le pouvoir autoréparateur des liants routiers, une autre technique envisagée est l'inclusion de fibres métalliques dans le béton bitumineux, qui devient ainsi conducteur électriquement. Il suffit ensuite de chauffer le matériau, en y induisant des courants électriques à l'aide d'un appareil dédié, pour refermer

les fissures et ainsi prolonger la durée de vie de la chaussée.

Économiser les ressources naturelles est ainsi l'un des objectifs de l'industrie routière. Un autre est de limiter les impacts environnementaux liés à la construction et l'entretien des routes ainsi qu'au trafic. Il s'agit entre autres de réduire la consommation d'énergie lors de la fabrication des matériaux bitumineux. Ainsi ont vu le jour

Parmi les objectifs : économiser les ressources naturelles et limiter les impacts environnementaux.

de nombreux procédés de fabrication et de mise en œuvre des enrobés à des températures moins élevées qu'auparavant (« enrobés tièdes »), voire à froid (avec des émulsions de bitume).

Un autre impact environnemental du trafic est le bruit, que l'on cherche à limiter là où il est le plus gênant, à savoir en milieu urbain et péri-urbain. Plusieurs techniques permettent de réduire le bruit au niveau du

contact pneu-chaussée. Ce bruit domine aux basses vitesses, par rapport à celui des moteurs, et il pourrait demain constituer la source sonore prépondérante avec la généralisation des véhicules électriques.

Les revêtements drainants, introduits dans les années 1970-1980 principalement afin de diminuer les projections d'eau par temps de pluie, constituent une première solution. Obtenus par mélange de granulats de grande et petite tailles, en évitant les tailles intermédiaires, ces matériaux sont très poreux et perméables. Or cela a aussi pour effet de limiter les surpressions d'air créées entre le pneu et la chaussée, en grande partie responsables du bruit de roulement. Des variantes plus récentes mettent en œuvre un empilement de couches drainantes de porosités distinctes, ce qui atténue le colmatage, donc la dégradation de la drainabilité avec le temps.

Dans le même ordre d'idées, on teste aux Pays-Bas des chaussées qui incluent dans leur partie supérieure des cavités préfabriquées de taille décimétrique. Ces cavités, qui constituent des « résonateurs de Helmholtz », sont conçues pour absorber les fréquences sonores caractéristiques du bruit de roulement.

Une autre solution, qui tend à se généraliser, consiste simplement à réaliser des revêtements formés de granulats plus petits (de l'ordre de 6 millimètres de diamètre au lieu de 14). On réduit ainsi les vibrations engendrées au contact pneu-chaussée, tout en améliorant les propriétés d'adhérence et ce sans détériorer la drainabilité.

Par ailleurs, en incorporant au bitume des granulats ou de la poudre de caoutchouc, issus notamment du recyclage de pneus usagés, on peut rogner encore quelques décibels sur le bruit. Enfin, les ingénieurs développent des murs antibruit de nouvelle génération, de structure fractale (la même structure se répétant à différentes échelles), qui aident à éliminer le bruit résiduel.

Les chaussées contribueront aussi à la lutte contre la pollution atmosphérique. Comme les murs extérieurs des bâtiments dans les villes, elles peuvent dégrader certains polluants grâce à la photocatalyse par dioxyde de titane (TiO_2). Sous l'effet des rayons ultraviolets reçus du Soleil, ce composé, incorporé dans les matériaux de construction, capte les oxydes d'azote (NO_x) présents dans l'air et les transforme



UNE PISTE CYCLABLE, dont l'une des deux voies (à gauche) est constituée de panneaux solaires sur une longueur de 100 mètres, a été inaugurée fin 2014 à Krommenie, aux Pays-Bas. Il s'agit d'une expérimentation pilote de route à énergie positive, produisant de l'électricité qui alimenterait l'éclairage, la signalisation, etc.

des zones à sols très compressibles, à la façon d'un petit ouvrage d'art.

En France, deux sections expérimentales de « chaussée urbaine démontable », l'une à Saint-Aubin-lès-Elbeuf, près de Rouen, l'autre à Nantes, démontrent la capacité à construire des chaussées pouvant être rapidement et facilement ouvertes et refermées, à l'aide d'un matériel léger et silencieux, ce qui réduit la gêne occasionnée par les travaux d'entretien des réseaux en sous-sol (voir les photographies page 33).

Produire de l'énergie

Dans le domaine du transport routier, la transition énergétique a pour écho la notion de routes à énergie positive, c'est-à-dire des routes qui collecteront de l'énergie pour leur propre usage – régulation thermique, signalisation, éclairage, etc. Il s'agira aussi de fournir l'énergie nécessaire aux véhicules électriques non seulement à partir de stations-services ou bornes adaptées, mais aussi à partir de dispositifs d'alimentation électrique continue route-véhicules.

Comment cela peut-il se traduire concrètement ? L'une des idées est d'exploiter l'énergie solaire, en tirant profit de la grande superficie occupée par les routes, emprises et espace roulant compris.

En Bavière, une usine photovoltaïque de un mégawatt a ainsi été installée le long de l'autoroute A94 en exploitant les pentes des déblais autoroutiers, ce qui évite tout conflit d'usage des terres agricoles. De façon plus novatrice, on peut recouvrir l'espace roulant lui-même de panneaux photovoltaïques.

Dans le cadre du projet *Solaroad*, le TNO (l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée) a ainsi conçu des panneaux de cellules photovoltaïques en silicium cristallin recouvertes d'une couche d'un centimètre d'épaisseur de verre trempé, cette couche étant rugueuse pour assurer un bon niveau d'adhérence. Selon ses concepteurs, le procédé produit 50 kilowattheures par mètre carré et par an (soit environ 1 % de l'électricité consommée par un foyer).

Une piste cyclable pilote longue de 100 mètres et large de 4 mètres a ainsi été inaugurée fin 2014 dans la ville de Krommenie, au Nord-Est de Haarlem (voir la photographie ci-dessus). Cette première phase du projet, prévue sur cinq ans, est destinée à mieux appréhender la gestion technique

en composés stables qui sont ensuite lessivés par les pluies. Par exemple, le fabricant français *Eurovia* commercialise un revêtement censé éliminer plus de 4 milligrammes d'oxydes d'azote par mètre carré et par heure.

Des chaussées en kit

Les routes devant répondre à des exigences de plus en plus complexes, une approche est de concevoir des éléments de chaussée préfabriqués en usine, qui seront utilisés sur des tronçons rectilignes limités. Ces éléments intégreront dans leur épaisseur les aménagements nécessaires aux différents réseaux (électricité, communications, etc.). Dans ce contexte, les ingénieurs développent des procédés de pose rapide qui raccourciront la durée des chantiers de construction. Et avec la possibilité de démonter ces éléments de chaussée, on pourra aisément remplacer ceux qui sont défectueux ou accéder aux réseaux souterrains.

Le procédé est d'ores et déjà utilisé pour certaines intersections de rues et voies de tramways. Par exemple, aux Pays-Bas, une section de l'autoroute A12 a été réalisée en 2006 sous forme de chaussée modulaire reposant sur des fondations à base de pieux. Cette chaussée modulaire, élaborée par le consortium *ModieSlab*, permet de franchir

Moins de chaleur, plus de lumière

On peut concevoir des revêtements qui font jouer aux chaussées urbaines un rôle de régulation thermique. Grâce à leur grande porosité, donc à l'air qu'ils contiennent, les enrobés drainants peuvent servir d'isolants, afin d'empêcher que le sol urbain emmagasine de la chaleur. Par ailleurs, en employant des granulats clairs, non seulement on rafraîchit le milieu urbain en période estivale (en augmentant l'albédo, la part du rayonnement réfléchi vers le ciel), mais on diminue aussi la puissance de l'éclairage public nocturne pour un même confort visuel des usagers.

et la rentabilisation de telles installations (stockage et redistribution du surplus d'énergie produit en période d'ensoleillement, impact du salissement, etc.).

L'architecte suédois Måns Tham a, lui, conçu le projet *Solar Serpent* (Serpent solaire) dans lequel il propose de transformer des autoroutes, notamment celles de Los Angeles, en usine électrique, en les couvrant d'un toit de panneaux photovoltaïques fixés sur un châssis en treillis (voir l'illustration pages 26-27). Outre la production d'électricité et sa consommation locale pour la signalisation, l'éclairage ou la recharge des véhicules, le concept a d'autres avantages : réduction du bruit pour les riverains, protection des chaussées contre les intempéries et le rayonnement ultraviolet, diminution de la climatisation à bord des véhicules grâce à l'ombre créée.

capte par temps ensoleillé la chaleur en surface, que l'on stocke ensuite dans des puits géothermiques verticaux situés en bord de route. Par temps froid et couvert, cette énergie est alors déstockée et rediffusée à travers les mêmes circuits, afin de maintenir la surface de la chaussée à température positive et éviter le dépôt de neige ou la formation de verglas. On utilise déjà cette technique pour réguler les températures des tabliers de certains ponts particulièrement sensibles au gel en Suisse (projet SERSO) et en Allemagne (pont de Berkenthin en Allemagne du Nord).

La déformation des routes sous l'action des véhicules peut également fournir de l'énergie, comme en ont eu l'idée des chercheurs du *Technion*, en Israël. Il s'agit de convertir les contraintes mécaniques en courant électrique par effet piézoélectrique,

L'Europe routière (UE-27, 2011)

69 600 km d'autoroutes
(11 490 km en France).

283 millions de véhicules,
dont 86 % de particuliers
(37,9 millions en France).

5 427 milliards
de voyageurs-kilomètres,
soit 93 % du transport
terrestre de voyageurs.

1 734 milliards
de tonnes-kilomètres de
marchandises transportées.

856 millions de tonnes
de CO₂ émises (23 % du total).



Dans le projet de Måns Tham, l'autoroute de Santa Monica, à Los Angeles (longue de 24 kilomètres pour une largeur de 40 mètres), recevrait ainsi un million de mètres carrés de panneaux, de quoi produire 150 gigawattheures d'électricité par an (soit la consommation d'environ 40 000 foyers) avec les techniques photovoltaïques actuelles.

Pour exploiter le rayonnement solaire sur les routes, une autre idée est de profiter du fort pouvoir d'absorption thermique des chaussées bitumineuses. Ces dernières peuvent, aux latitudes de la France, atteindre 60 à 65 °C en été. En faisant circuler un fluide caloporteur dans un serpent enfoncé dans la chaussée, on

les dispositifs piézoélectriques étant intégrés à la chaussée.

Ce type de technique est toutefois discutable. L'énergie obtenue est prélevée d'une façon ou d'une autre sur celle des véhicules, ce qui n'apporte globalement rien en termes d'économies d'énergie. En revanche, la technique piézoélectrique permettrait d'assurer certains services en des lieux isolés, non connectés au réseau d'alimentation électrique.

Le transport routier consommant beaucoup d'énergie fossile, les véhicules actuels seront, à terme, remplacés par des véhicules électriques. La route du futur doit non seulement s'y adapter, mais aussi être pensée comme partie

LES CHAUSSEES URBAINES DÉMONTABLES

sont des chaussées conçues pour être facilement ouvertes et refermées, dans un délai d'environ une demi-journée, notamment afin d'accéder aux réseaux souterrains. Une telle chaussée modulaire (ci-dessus, une première mondiale réalisée en 2009 à Saint-Aubin-lès-Elbeuf, en Seine-Maritime) simplifie beaucoup les travaux de voirie.

intégrante de nouvelles boucles d'énergie infrastructures-véhicules.

Pour les voitures électriques, on privilégie aujourd'hui le recours à des bornes de recharge individuelles (à domicile) ou collectives (dans la rue). L'utilisateur branche lui-même son véhicule à la borne, ce qui n'est pas très commode. D'autres solutions sont à l'étude, par exemple le « biberonnage » qui consiste à connecter automatiquement les véhicules électriques aux bornes électriques. Une station expérimentale de biberonnage existe ainsi dans le XVI^e arrondissement de Paris depuis janvier 2012.

Pour augmenter l'autonomie des véhicules, une autre approche consiste à leur fournir l'énergie électrique sans qu'il y ait contact, à l'aide de techniques fondées sur l'induction électromagnétique. Divers procédés sont en cours de mise au point. Devant les difficultés à stocker l'énergie électrique à bord des véhicules, l'enjeu est aussi de passer de la recharge statique à la recharge dynamique, c'est-à-dire une recharge des batteries du véhicule pendant qu'il roule. Il ne s'agit pas d'assurer une telle fonction sur la totalité des routes et de leurs tracés, mais sur certains segments plus stratégiques ou énergivores, tels que la périphérie des grandes villes ou les longues sections autoroutières en montée.

La société Siemens expérimente ainsi l'adaptation du système de caténaires des trolleybus (dont les premiers exemplaires datent de 1882) pour la recharge de poids-lourds à moteurs hybrides électricité-diesel. L'alimentation par le sol, développée par Alstom à la fin des années 1990 pour les tramways (par exemple à Bordeaux), est une autre méthode possible, moins intrusive pour l'environnement et les paysages. Elle consiste à implanter un rail d'alimentation en milieu de voie, qui vient en contact avec des « frotteurs » du tramway. Le rail est segmenté en tronçons, qui ne sont actifs que s'ils sont entièrement recouverts par le tram, afin d'éviter tout risque d'électrocution pour les autres usagers de la voie (piétons, cyclistes, etc.). Cette technique est en cours d'adaptation aux véhicules routiers.

De son côté, l'entreprise Bombardier a montré qu'il est possible d'alimenter en marche et sans contact, par couplage

inductif, des tramways ou des véhicules routiers. À l'Isttar, nous avons vérifié qu'il est possible d'intégrer cette solution dans les chaussées sans diminuer leur durée de vie. L'expérimentation de la société OLEV en Corée du Sud a également montré qu'on peut transposer le principe à la route. Fondé sur des dispositifs de recharge enfouis dans la chaussée, le système coréen recharge des véhicules à l'arrêt ou en mouvement avec un rendement énergétique supérieur à 80 %. Il est d'ores et déjà exploité dans un parc d'attraction pour faire circuler des véhicules touristiques. Mais l'alimentation sans contact d'un flux continu de véhicules, aux trajectoires moins contraintes donc moins prévisibles, reste l'objet de recherches (projet européen FABRIC, notamment).

Des capteurs intégrés à la voie ou portés par les véhicules mesureront les conditions météorologiques et de trafic

Ces quelques exemples illustrent les différentes fonctions énergétiques que les routes de cinquième génération seront appelées à remplir. On voit aussi apparaître la notion de système faisant intervenir à la fois les véhicules, les routes et les dispositifs mis en place pour les contrôler. Ce système est au cœur du troisième défi sociétal auquel les routes doivent répondre, celui d'une mobilité durable, sûre et efficace.

En particulier, l'état des routes pourra être déterminé en permanence et en temps réel, informations qui seront transmises aux autorités ou dispositifs de contrôle afin de reconfigurer dynamiquement les routes et le trafic. Dans un proche avenir, les différents centres de gestion de la mobilité (trafic,

transports collectifs, parkings, péages, etc.), les capteurs installés le long des routes et les véhicules seront largement interconnectés.

L'entretien et la maintenance des infrastructures tireront avantage de ces réseaux d'information. Des capteurs embarqués sur les véhicules détermineront presque en temps réel l'état du revêtement, tandis que des réseaux de capteurs intégrés aux chaussées mesureront le vieillissement de ces dernières, afin de prédire leur dégradation et d'aider le gestionnaire à choisir le moment et la nature des travaux de maintenance à réaliser.

Quelques exemples laissent imaginer les bénéfices attendus de l'interaction entre réseaux d'information et véhicules communicants. Ainsi, des dispositifs de capteurs placés en bord de voie ou à bord des véhicules mesureront les conditions météorologiques (brouillard, températures de chaussée, hauteur de neige, etc.). Ces informations seront échangées entre les différents acteurs du trafic et transmises aux systèmes d'information des usagers de la route. Ces derniers pourront alors rouler à des vitesses adaptées, voire emprunter des itinéraires alternatifs qui optimisent la consommation d'énergie, le temps de parcours et la sécurité.

De même, grâce à une communication généralisée, on pourra reconfigurer l'espace routier en fonction de la demande de déplacement, en s'appuyant sur une signalisation plus innovante. La signalisation routière classique (marques sur chaussées, panneaux) a l'inconvénient de rester inchangée quelles que soient les conditions de circulation. Pour pallier cet inconvénient, l'usage de plots à diodes électroluminescentes (LED), en complément de la signalisation existante, fait son apparition et permet par exemple d'affecter dynamiquement les voies de circulation en fonction du trafic. Sur le pont de Saint-Nazaire, le Conseil général de Loire-Atlantique expérimente une telle solution : la voie centrale du pont change de sens le matin et le soir afin d'optimiser les trajets domicile-travail.

Dans le même ordre d'idées, on peut imaginer qu'en milieu péri-urbain, les autoroutes allouent dynamiquement, selon le jour et l'heure, des voies supplémentaires

pour les «covoitureurs» et les transports collectifs. De façon similaire, en milieu urbain, l'espace public serait reconfiguré par une signalisation modulable en fonction de l'heure de la journée ou du jour de la semaine, notamment pour optimiser le partage entre les différents modes de transport (véhicules de particuliers ou en libre partage, cyclistes, piétons, transports en commun, etc.).

Des démonstrateurs

On le voit avec les exemples présentés tout au long de cet article, les chercheurs et les ingénieurs élaborent des techniques diverses et nombreuses en vue de relever les grands défis du transport routier. Lesquelles seront effectivement déployées ? La concrétisation des meilleures idées nécessite, outre leur indispensable acceptabilité sociétale, une structuration du milieu scientifique et industriel autour de démonstrateurs de recherche partagés. Intermédiaire entre le laboratoire et le déploiement industriel, le démonstrateur de recherche est une

BIBLIOGRAPHIE

N. Hautière et al., La « route » de cinquième génération (R5G), *Revue Générale des Routes et Autoroutes*, vol. 910, pp. 28-35, 2013.

N. Hautière et al., Comment adapter les infrastructures routières aux enjeux de la mobilité de 2030, *Transport Environnement Circulation*, vol. 216, pp. 25-32, 2013.

M. Lamb et al., The Forever Open Road - Defining the next generation road, *Routes/Roads*, vol. 352-353, pp. 120-129, 2012.

expérimentation, de préférence en vraie grandeur et sur route ouverte, qui accélère l'évaluation des solutions conçues en laboratoire et qui identifie les plus prometteuses d'entre elles. L'ancienne autoroute A199, près de notre institut à Marne-la-Vallée, devrait ainsi servir dès 2017 à préfigurer une route de cinquième génération, comme le stipule un accord-cadre signé fin 2014 entre le Conseil général de Seine-et-Marne, l'Établissement public d'aménagement Epamarne et l'Ifsttar.

Ainsi, pour répondre aux exigences actuelles du développement durable, de la transition énergétique et de la mobilité, les routes du futur seront plus économes, adaptables, automatisées, résilientes au changement climatique. Dans un contexte socio-économique devenu délicat, leur déploiement constitue un immense défi. Il faudra le relever pour préserver notre mobilité. En comparaison avec le passé, ce sont la multiplicité des enjeux et la synergie nécessaire entre acteurs d'horizons très différents qui rendent ce défi à la fois complexe et passionnant. ■

Dans l'interêt de la science

mathieu vidard | **la tête au carré 14:05-15:00**

france inter venez
franceinter.fr

CANCER

ces cellules qui perdent le contact

Jean-Pascal Capp

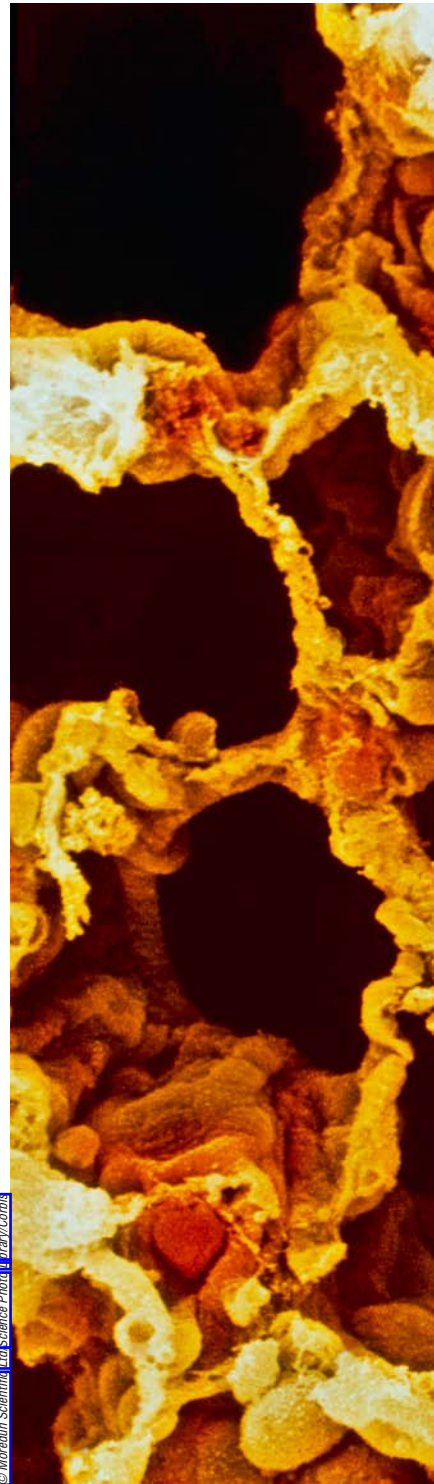
Et si la cause première des cancers n'était pas une altération des gènes, mais un défaut de communication de cellules avec leur environnement ? Rétablir le contact pallierait les limites des thérapies actuelles.

Début janvier, une étude statistique sur la survenue des cancers a été largement relayée dans la presse, souvent à travers des interprétations abusives. « La malchance à l'origine de la plupart des cancers », « Deux cancers sur trois imputables à la malchance », « Le hasard, cause principale de cancer »... Tels sont quelques-uns des titres qui ont fleuri sur le Net. Le travail en question établit une corrélation mathématique entre la fréquence d'apparition des cancers dans certains tissus et la fréquence des divisions des cellules souches dans ces tissus. Ces divisions, à la base du renouvellement des tissus, peuvent être nombreuses, comme dans l'intestin, ou plus rares, comme dans les os. Or plus une cellule se divise, plus le risque est grand qu'une mutation aléatoire apparue lors d'une division perturbe un gène lié au développement d'un cancer. Les

auteurs, Cristian Tomasetti et Bert Vogelstein, en ont conclu que dans deux tiers des cas, la fréquence élevée des cancers est due à la malchance – des mutations aléatoires apparues lors des divisions cellulaires – plus qu'à des facteurs environnementaux ou à des prédispositions génétiques.

L'utilisation du terme « malchance » a entraîné des raccourcis : on a ainsi pu lire qu'une majorité de ces cancers sont dus à des mutations dont il n'existe aucun moyen de se prémunir. Il ne serait donc pas nécessaire de surveiller son mode de vie et d'éviter l'exposition à des environnements délétères puisque l'apparition de ces cancers ne serait due qu'à la « malchance génétique » des individus affectés.

Au-delà du caractère critiquable de divers aspects de ce travail et des maladresses des chercheurs dans certaines formulations, cette étude est surtout





QUELLE EST L'ORIGINE DES TUMEURS, telle celle-ci (*en bleu*), observée par microscopie électronique dans une alvéole d'un poumon humain ? Elles apparaîtraient lorsque l'environnement local des cellules est perturbé.

L'ESSENTIEL

■ Dans la lutte contre le cancer, les thérapies ciblées atteignent leurs limites à cause de l'hétérogénéité des cellules dans une tumeur.

■ Ces thérapies sont fondées sur l'idée que l'origine du cancer est génétique.

■ Une autre explication permettra peut-être de dépasser leurs limites : une tumeur surviendrait lorsqu'une perturbation fait perdre aux cellules le contact avec leur environnement.

■ Rétablir ce contact pourrait normaliser les cellules cancéreuses.

L'AUTEUR



Jean-Pascal CAPP est maître de conférences en biologie moléculaire à l'Insa de

Toulouse/Université fédérale Toulouse Midi-Pyrénées et membre du Laboratoire d'ingénierie des systèmes biologiques et des procédés, à l'Insa.

À ÉCOUTER

Le jeudi 2 avril 2015, de 14h à 15h, Jean-Pascal Capp reviendra sur cette nouvelle vision des cancers dans la partie *Actualités* de l'émission *La marche des sciences* sur France Culture. www.franceculture.com

symptomatique du poids donné aux mutations dans la survenue du cancer, poids qui motive les recherches génomiques sur cette maladie. Pourtant, un nombre croissant d'études suggèrent que les mutations ne sont pas les causes premières des cancers, mais seulement des facteurs qui en favorisent l'apparition. Une tumeur – une population de cellules se comportant différemment – se formerait dans un tissu de l'organisme non pas à cause d'une mutation survenue, mais lorsqu'un changement dans l'environnement des cellules leur ferait perdre la communication avec leur entourage. Et si rétablir la communication entre cellules permettait d'éliminer la tumeur ? Ces idées ne sont pas encore très répandues, mais pourraient, en changeant notre façon de voir et de combattre le cancer, offrir un moyen de dépasser les limites des stratégies thérapeutiques fondées sur la génétique.

Des mutations variées d'une cellule à l'autre

La théorie de l'origine génétique des cancers domine les recherches actuelles sur ces maladies. Selon cette théorie, pour qu'une tumeur se développe, une cellule du tissu d'origine doit acquérir des modifications génétiques lui permettant d'échapper au contrôle que le tissu exerce sur la prolifération cellulaire. Ses cellules-filles commencent alors à envahir le tissu jusqu'à rompre ses barrières et provoquer des métastases grâce à l'acquisition de nouvelles modifications génétiques qui leur confèrent un avantage de croissance et les rendent plus agressives. Le déclenchement du processus se situe bien ici au niveau génétique, et c'est une cellule unique qui en est à l'origine.

Depuis quelques années, la recherche sur le cancer bénéficie de la révolution technologique qui permet de séquencer des génomes de plus en plus facilement et à bas coût. Les publications qui recensent les altérations génétiques contenues dans les cellules cancéreuses se multiplient. On dispose désormais d'une description précise du contenu génétique de cellules issues de nombreux types de cancer, et de multiples tumeurs de chaque type.

Ces données sont les premières à confirmer l'ampleur de la complexité génétique des cancers, suspectée depuis longtemps. Dans de nombreux cancers des tissus solides, les altérations se comptent en dizaines de

milliers de mutations et en dizaines de modifications plus vastes des chromosomes (pertes ou gains de morceaux de chromosomes ou de chromosomes entiers). La situation est en général moins complexe pour les cancers des tissus liquides, tel le sang, sans toutefois être simple.

Dans tous les cas, il s'agit d'un instantané de la situation au moment du prélèvement. Même si certains travaux permettent désormais de reconstruire l'histoire génétique de la tumeur, il reste difficile de cerner la dynamique et l'enchaînement des événements qui ont conduit à l'accumulation de ces modifications génétiques. Pour effectuer un premier tri, on considère que toutes les mutations n'ont pas le même poids : certaines, dites motrices, ont un rôle important dans la progression de la maladie, tandis que les autres, dites passagères, ne constituent qu'un bruit de fond de peu d'importance.

Par définition, les mutations motrices confèrent aux cellules qui les portent un avantage dans le processus évolutif qu'est la cancérogenèse. On devrait donc les retrouver dans de nombreuses cellules. C'est d'ailleurs grâce à la recherche de populations de cellules portant les mêmes mutations que les méthodes informatiques permettent de reconstituer l'histoire génétique des tumeurs. Pourtant, les choses ne sont pas aussi simples, nous allons le voir.

Dans la lignée de ces travaux, il existe désormais une véritable course au séquençage. Elle vise d'une part à mieux comprendre la genèse des pathologies et à trouver les mutations motrices dans chaque cas, et, d'autre part, à faire émerger de potentielles cibles thérapeutiques. Oncologues et biologistes du cancer affirment que la révolution génomique est en marche et que l'on pourra bientôt établir la « carte d'identité » génétique de chaque tumeur. Cela permettra de définir le cocktail de traitements qui entraînera la guérison. Toutefois, ces stratégies se heurtent à un obstacle majeur : l'hétérogénéité génétique interne des tumeurs. Il est maintenant bien établi que celles-ci sont constituées de sous-populations souvent génétiquement très hétérogènes.

On comprend donc les limites de stratégies thérapeutiques qui ciblent des gènes altérés dans les cellules cancéreuses : il est fort probable que certaines cellules n'y soient pas sensibles, ne contenant pas les altérations ciblées. Mais, me direz-vous, il suffit alors de séquencer le génome de plusieurs parties

de la tumeur pour prendre en compte cette hétérogénéité et éviter les résistances dues à ce phénomène. Cependant, même alors, chaque séquençage concernera toujours une population cellulaire limitée et les séquences obtenues ne représenteront qu'une moyenne du génome des cellules de la zone considérée (les altérations peu fréquentes, par exemple, ne seront pas détectées).

Or depuis 2012 et les premiers séquençages de génomes de cellules uniques issues de tumeur, on sait que l'hétérogénéité génétique va jusqu'à l'échelle de la cellule individuelle. Et puisque les génomes sont parfois très hétérogènes d'une cellule cancéreuse à l'autre, il est donc aussi probable que les cellules d'une même zone de la tumeur soient génétiquement divergentes. Dans des cas de cancer du rein, il n'a même pas été possible de détecter de mutation motrice commune dans des cellules séquencées individuellement.

C'est bien sûr un coup dur pour les défenseurs des thérapies ciblées contre des altérations génétiques spécifiques, car, au moins dans certains cas, des cellules d'un même cancer ne semblent pas avoir beaucoup d'altérations génétiques en commun,

voire aucune. Mais c'est aussi une remise en question du modèle génétique de l'origine des cancers : si aucune mutation motrice commune n'est observée, comment imaginer que des mutations sont à l'origine du processus ? On peut toujours arguer que les mutations initiales ont été « diluées » ou ont disparu au cours de l'évolution de la tumeur, ne constituant plus un avantage sélectif pour les cellules. Mais on peut aussi se demander s'il n'est pas nécessaire de revoir notre conception de l'origine des cancers au vu de ces résultats pour appréhender différemment les stratégies thérapeutiques. De fait, un autre facteur est à considérer : l'hétérogénéité intratumorale n'est pas seulement génétique. Les tumeurs présentent aussi une hétérogénéité à d'autres niveaux moléculaires qui a des conséquences majeures en termes d'agressivité de la maladie et de résistance thérapeutique.

Depuis quelques années, on sait qu'au sein d'une tumeur, les cellules n'ont pas toutes la même activité. Certaines voies de signalisation sont activées différemment selon les cellules. Ces voies sont constituées de cascades de réactions biochimiques dans la cellule. Elles commencent souvent

Glossaire

Expression des gènes :

Lecture et traduction du matériel génétique d'une cellule. Elle a un caractère aléatoire, car elle dépend des rencontres entre diverses molécules dans la cellule.

Mutation motrice :

Altération d'un gène qui joue un rôle important dans la progression d'un cancer, par opposition aux mutations passagères.

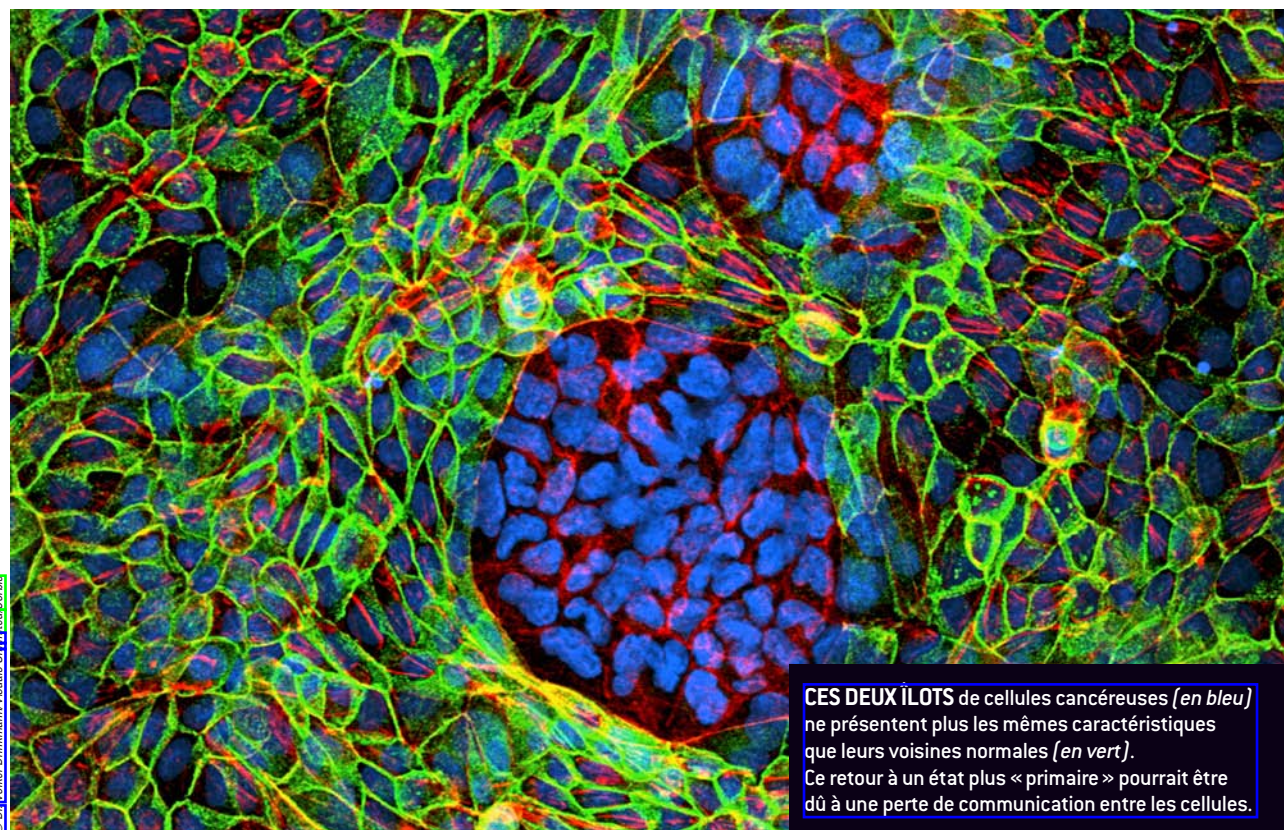
Différenciation :

Processus par lequel des cellules se spécialisent en un type cellulaire.

Cellule souche : cellule capable de se différencier en plusieurs types cellulaires.

Cellules souches

cancéreuses : cellules cancéreuses aux propriétés de cellules souches.



CES DEUX ÎLOTS de cellules cancéreuses (en bleu) ne présentent plus les mêmes caractéristiques que leurs voisines normales (en vert). Ce retour à un état plus « primaire » pourrait être dû à une perte de communication entre les cellules.

au niveau d'un récepteur en surface de la cellule pour aboutir à des protéines qui, dans le noyau cellulaire, régulent l'expression des gènes, c'est-à-dire leur lecture et traduction en protéines. Ces variations entraînent des réponses aux thérapies différentes d'une cellule à l'autre – certaines survivant et d'autres non – sans que cela soit d'origine génétique.

Les cellules souches : une clé pour comprendre

Une même population de cellules portant des génomes identiques présente aussi en général différents profils d'expression des gènes, qui entraînent des réponses différentes à une même molécule toxique. De façon plus globale, lorsque des cellules cancéreuses génétiquement identiques sont utilisées pour reformer des tumeurs chez des animaux sains, les vitesses de prolifération

sont très hétérogènes, de même que les réponses thérapeutiques. C'est notamment ce qu'ont observé en 2013 Antonija Kreso, de l'Université de Toronto au Canada, et ses collègues en transplantant chez des souris des lignées de cellules issues de cancers colorectaux humains. La variabilité fonctionnelle des cellules d'une tumeur est donc un élément majeur à prendre en compte.

D'où provient-elle ? Plusieurs origines sont possibles. Elle peut être causée par la variabilité épigénétique : des modifications biochimiques de l'ADN et des protéines autour desquelles elle s'enroule, les histones, régulent l'expression des gènes sans changer la séquence de l'ADN. Différentes d'une cellule à l'autre, ces modifications introduisent une variabilité fonctionnelle.

Une autre source de variabilité est le microenvironnement cellulaire, c'est-à-dire les cellules et les molécules qui entourent la cellule considérée. Enfin, même dans un

environnement homogène, des cellules génétiquement identiques expriment parfois différemment leurs gènes.

Ce dernier point a été trop peu considéré dans le cadre du cancer. Pourtant, il est connu depuis longtemps et, au début des années 2000, plusieurs études ont mesuré avec précision la variabilité d'expression d'une cellule à l'autre. Ce phénomène est lié au caractère aléatoire des événements à la base de l'expression des gènes, tels que les rencontres entre protéines, ou entre protéines et ADN. Ces événements sont dits probabilistes, car ils se produisent au gré des mouvements des molécules dans la cellule, eux-mêmes aléatoires.

Lorsque la variabilité de l'expression des gènes est discutée, c'est son importance dans la réponse thérapeutique qui est souvent mise en avant. Mais il faut aussi s'interroger sur son rôle dans la genèse et la progression de la maladie elle-même.

Des cellules cancéreuses redeviennent normales

Placées dans un environnement adéquat, des cellules cancéreuses retrouvent un comportement normal, selon plusieurs études publiées ces dernières années. Dès 1975, Beatrice Mintz et Karl Illmensee, à Philadelphie, ont observé que l'injection de cellules de tératocarcinome dans des embryons précoces de souris supprime leur caractère cancéreux.

Et quand ces biologistes ont réimplanté chez la souris les embryons obtenus, constitués donc d'un mélange de cellules cancéreuses « normalisées » et de cellules de l'embryon original, ces embryons se sont développés normalement. Des cellules malignes incorporées dans l'embryon ont ainsi contribué à former une grande variété de tissus. En revanche, injectées dans la peau ou l'abdomen d'une souris adulte, les mêmes cellules restent cancéreuses et tuent la souris.

De même, lorsque des noyaux de cellules cancéreuses sont introduits dans des ovocytes de mammifères dont on a enlevé le noyau, leurs propriétés cancéreuses sont supprimées : les ovocytes obtenus produisent

des cellules souches embryonnaires capables de donner une souris adulte.

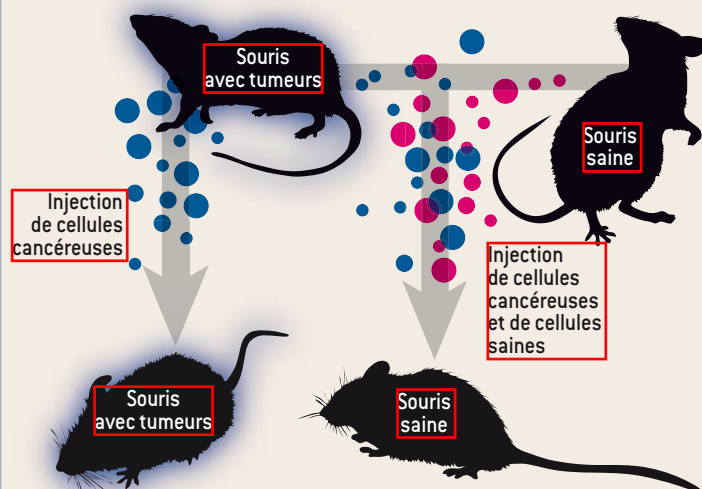
Par ailleurs, des cellules de carcinome du foie du rat forment des tumeurs lorsqu'elles sont injectées sous la peau, mais se comportent en cellules normales du foie lorsqu'elles sont transplantées dans leur organe et tissu d'origine, tant que le rat est jeune (les rats plus âgés développent en revanche des tumeurs).

En 2011, l'équipe de Gilbert Smith, à l'Institut américain du cancer, à Bethesda, a réalisé une expérience similaire avec des cellules mammaires de souris. Elle a montré que des cellules mammaires de souris rendues cancéreuses par l'introduction d'un virus se comportent

normalement lorsqu'elles sont injectées avec des cellules mammaires normales pour régénérer une partie de la glande mammaire. Injectées seules, en revanche, elles produisent une tumeur (voir la figure).

Enfin, plusieurs expériences ont montré que la culture de cellules tumorales sur une couche de cellules normales permet parfois leur normalisation. Ce fut le cas de

cellules de mammifères infectées par le virus du polyome ou irradiées aux UV, ou de cellules de poulet transformées par le virus du sarcome de Rous. Des cellules normales de peau peuvent aussi normaliser des cellules de papillomes, des tumeurs bénignes caractéristiques de la peau. Injectées ensemble dans la peau de souris, elles ne produisent aucun papillome.



Les cellules souches sont peut-être une clé pour comprendre ce rôle. Elles sont caractérisées par une expression des gènes particulièrement variable et généralisée. Au contraire, les cellules différenciées (les cellules-filles des cellules souches qui se sont spécialisées en un type cellulaire) expriment moins de gènes et de façon plus homogène et plus stable. Cette stabilisation de l'expression se produit au cours du développement et de la différenciation, lorsque les cellules sont peu à peu prises dans un réseau d'interactions et de communications cellulaires propres au tissu où elles se différencient. Reste à comprendre comment se produit cette stabilisation.

Selon la vision classique, déterministe, de la biologie moléculaire, cette stabilisation est programmée dans le génome : des régulations spécifiques de gènes aboutissent à la différenciation selon un schéma codé dans le génome. Toutefois, la réalisation

BIBLIOGRAPHIE

N. McGranahan et C. Swanton, **Biological and therapeutic impact of intratumor heterogeneity in cancer evolution**, *Cancer Cell*, vol. 27, pp. 15-26, 2015.

J.-P. Capp, **Le rôle des phénomènes aléatoires dans le cancer**, *Med. Sci.*, vol. 30, pp. 693-698, 2014.

A. Marusyk et al., **Intra-tumour heterogeneity: a looking glass for cancer ?**, *Nat. Rev. Cancer*, vol. 12, pp. 323-334, 2012.

J.-P. Capp, **Nouveau regard sur le cancer. Pour une révolution des traitements**, Belin-Pour la Science, 2012.

J.-J. Kupiec, **L'origine des individus**, Fayard, 2008.

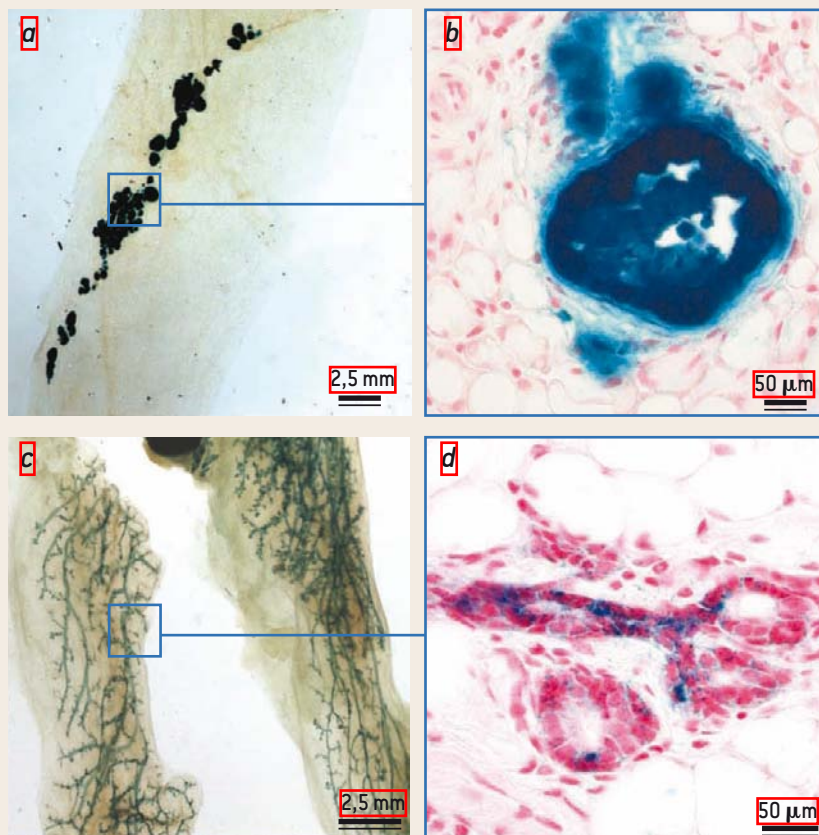
d'un tel schéma nécessiterait des régulations fines et des niveaux précis d'expression de gènes qui semblent incompatibles avec l'expression hautement aléatoire des gènes dans les cellules souches.

Une théorie alternative serait de considérer que les gènes sont exprimés de manière probabiliste et que l'apparition des phénotypes, en particulier des caractéristiques de différenciation ou métaboliques, est un phénomène aléatoire. Dans ce cas, l'expression des gènes ne serait stabilisée qu'*a posteriori*, lors d'un processus de sélection, par l'environnement cellulaire, des cellules qui expriment les caractéristiques « adéquates » : seules les cellules capables d'établir des interactions et des communications stables et stabilisatrices avec cet environnement seraient conservées. Par exemple, seules les cellules qui porteraient à leur surface l'arsenal de protéines capable de communiquer avec des cellules du foie seraient préservées dans le foie. Les interactions établies entraîneraient une signalisation cellulaire qui conduirait à la stabilisation. La différenciation et la quiescence (le repos des cellules, qui ralentissent leur rythme de division) seraient ainsi les conséquences de cette stabilisation.

Une maladie du développement ?

Cette théorie du développement, nommée ontophylogenèse, a été proposée à partir du début des années 1980 par le biologiste Jean-Jacques Kupiec, membre du Centre Cavallès, à l'École normale supérieure à Paris. Elle constitue une alternative aux schémas centrés sur les gènes, car ici, le génome produit des protéines de manière aléatoire, et l'environnement sélectif constitue le facteur déterminant dans l'acquisition de phénotypes stables.

Si la structure tissulaire est le fruit d'un tel équilibre trouvé lors de la « canalisation » des cellules au cours de la différenciation, toute rupture de cet équilibre pourrait déstabiliser les cellules différenciées. Dans ce cas, la différenciation et la quiescence des cellules ne seraient plus maintenues, car l'expression des gènes, aléatoire, ne serait plus contrôlée par le microenvironnement cellulaire. La variabilité de l'expression des gènes serait donc globalement augmentée, comme si les cellules différenciées redevenaient indifférenciées – se « dédiffénciaient ».



INJECTÉES SEULES DANS LA GLANDE MAMMAIRE d'une souris, des cellules mammaires cancéreuses (en bleu) produisent des tumeurs (a, b). En revanche, injectées avec des cellules mammaires normales (en rose), elles contribuent à la maturation de la glande (c, d).

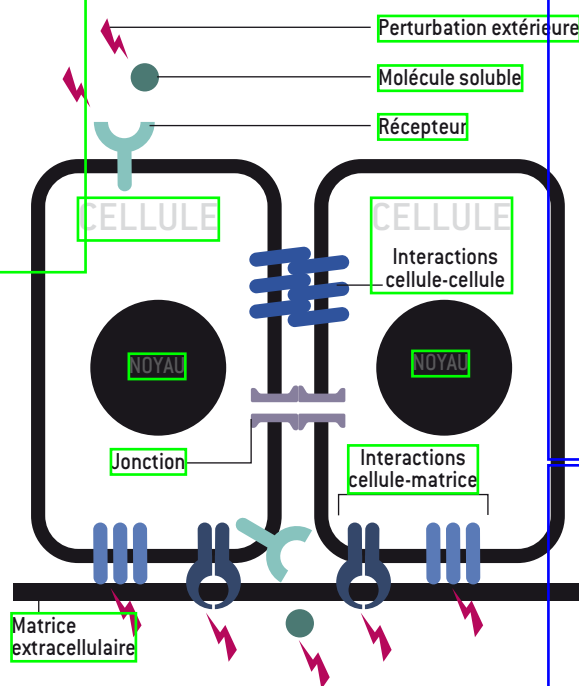
Dans cette vision, le cancer serait donc une maladie du développement. La maladie apparaîtrait par exemple à cause d'une altération des membranes des cellules, des jonctions entre cellules, des molécules d'adhésion ou des molécules solubles qui diffusent entre les cellules et constituent un mode d'interaction à distance, telles que les facteurs de croissance ou les hormones. Le bisphénol A et d'autres perturbateurs endocriniens, des substances chimiques qui imitent le fonctionnement des hormones, sont une source possible de perturbation de ces interactions à distance. Ce phénomène est étudié notamment par Ana Soto et Carlos Sonnenschein, de la Faculté de médecine de l'Université Tufts, à Boston, qui militent eux aussi pour une vision plus tissulaire de la genèse des cancers.

On peut aussi imaginer que, à cause d'un défaut dans les communications cellulaires, des cellules souches normales de l'organisme ne parviennent pas à mettre en place les interactions cellulaires nécessaires à leur différenciation. Elles conserveraient alors des caractéristiques de cellules souches, mais échapperaient au contrôle du microenvironnement. Cette théorie expliquerait la présence de cellules aux propriétés de cellules souches dans le cancer, nommées cellules souches cancéreuses.

Que deviennent les mutations dans cette vision du cancer ? Elles seraient un effet collatéral du défaut d'interaction cellulaire. Ce défaut perturberait les processus qui maintiennent l'intégrité génétique et épigénétique, ce qui favoriserait l'apparition aléatoire d'altérations génétiques ou épigénétiques. Certaines altérations seraient ensuite perpétuées en fonction de la pression sélective dans la tumeur. Cela ne signifie donc pas que le rôle de ces altérations est négligeable : dans ce modèle où un échec du contrôle microenvironnemental est à l'origine des cancers, si des cellules précancéreuses contiennent déjà de nombreuses modifications génétiques dues à des agents mutagènes ou des prédispositions génétiques au

cancer, il est fort probable qu'elles seront plus agressives et plus rapidement que des cellules présentant peu d'altérations génétiques. La probabilité qu'une tumeur se forme augmente alors, mais seulement si l'environnement correct du tissu n'est pas maintenu.

Il s'agit donc d'un renversement complet de perspective : la rupture de l'équilibre tissulaire est l'événement déclencheur, les altérations génétiques et épigénétiques sont des éléments promoteurs et accélérateurs. Plusieurs résultats expérimentaux qui ne



LA PERTURBATION DE MOLECULES intervenant dans les interactions des cellules avec leur environnement serait à l'origine des cancers en déstabilisant l'organisation du tissu. Ces molécules sont des composés solubles tels que des facteurs de croissance ou des hormones, mais aussi leurs récepteurs, des protéines d'interaction ou de jonction entre cellules, ou encore des protéines de la membrane cellulaire interagissant avec la matrice extracellulaire.

trouvent pas leur place dans la théorie classique fondée sur les mutations génétiques peuvent être ici réinterprétés et former un cadre théorique expliquant de nombreuses propriétés cancéreuses. C'est notamment le cas de travaux montrant que les cellules cancéreuses se « normalisent » lorsqu'elles interagissent avec des cellules normales (voir l'encadré page 40).

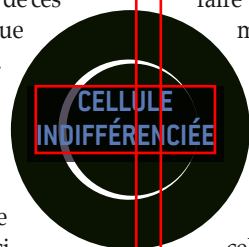
Cette compréhension nouvelle de l'origine des cancers aiderait à développer une intervention thérapeutique réellement efficace. Depuis les débuts des chimio- et radiothérapies, les phénomènes de

résistance sont connus, décrits et craints. De plus, on s'aperçoit que les nouvelles thérapies ciblées, visant un ou plusieurs gènes spécifiques, entraînent elles aussi l'apparition rapide de cellules résistantes, ce qui oblige à les coupler aux chimiothérapies standards, avec une efficacité toutefois (très) limitée. Les biologistes ont émis plusieurs hypothèses pour expliquer ces résistances. L'une d'elles concerne les cellules souches cancéreuses. Celles-ci prolifèrent peu dans la tumeur, contrairement à leurs cellules-filles – les cellules plus différenciées qu'elles produisent et qui, elles, ont un pouvoir prolifératif immense. Or la majorité des traitements chimio- et radiothérapeutiques ciblent les cellules prolifératives. Les cellules souches cancéreuses échapperaient ainsi au traitement et accumuleraient les altérations génétiques, développeraient de nouvelles résistances et les transmettraient à leurs cellules-filles, ce qui provoquerait des cancers secondaires plus résistants aux traitements que les tumeurs primaires.

Cette théorie des cellules souches cancéreuses a suscité un regain d'intérêt pour un type de thérapie délaissé jusqu'ici : la thérapie par la différenciation. L'idée est de provoquer, d'une manière ou d'une autre, la différenciation des cellules souches cancéreuses afin de les rendre plus sensibles aux médicaments classiques et, ainsi, d'entraîner plus facilement leur mort. Diverses stratégies ont été imaginées pour y parvenir : il s'agit par exemple de cibler des gènes spécifiques des cellules souches cancéreuses ou de cibler les « niches » où ces cellules sont maintenues dans la tumeur. Les tentatives de thérapies par la différenciation ont été nombreuses depuis 30 ans, avec toutefois très peu de succès. Seul un traitement contre la leucémie aiguë promyélocytaire est clairement fondé sur ce principe. Pourquoi un tel échec alors que le principe semble être pertinent au vu des données les plus récentes de la biologie du cancer ?

Ces essais étaient fondés sur une vision très déterministe de la différenciation et tentaient de faire exprimer ou réexprimer par les cellules des gènes de la différenciation

en partant du principe que cela suffirait à stabiliser leur phénotype et arrêter la prolifération. Or nous avons vu que l'identité des cellules souches ne réside pas tant dans le fait d'exprimer ou non des gènes précis que dans le caractère instable de ces cellules, tant du point de vue génétique que phénotypique. C'est donc cette instabilité et cette plasticité qu'il faut viser en priorité, mais encore faut-il en comprendre l'origine. C'est justement ce que permet la théorie exposée ici.



Rétablir le contact entre les cellules

Dans cette théorie, c'est la rupture des interactions et des communications cellulaires qui déstabilise les cellules. Il s'agirait donc de chercher comment les stabiliser à nouveau en intervenant sur leurs relations avec le microenvironnement. En particulier, il s'agirait de rétablir des interactions similaires ou proches de celles qu'on trouvait dans le tissu d'origine. Comment ? En agissant en deux étapes.

Dans un premier temps, il faudrait rétablir, dans les cellules cancéreuses, l'expression des gènes qui leur permettent d'interagir avec leur environnement. Cela est possible en agissant par exemple au niveau épigénétique. Des molécules qui agissent par ce biais sont déjà en test actuellement pour rétablir l'expression de gènes provoquant la différenciation des cellules ou leur mort.

Toutefois, telle quelle, cette stratégie ne diffère pas de celles issues du modèle déterministe de la différenciation, dans lequel cette manipulation devrait suffire à stabiliser les phénotypes différenciés. Et on a vu qu'une telle approche n'est pas à la hauteur des attentes, peut-être parce que cette première étape ne suffit pas. En effet, sans une stabilisation artificielle de la réexpression des gènes de la différenciation, celle-ci risque de ne pas être maintenue, car elle constitue un désavantage pour les cellules : les gènes de la différenciation confèrent aux cellules des spécificités qui les rendent moins « passe-partout » et favorisent leur contre-sélection (leur élimination) au sein d'une population qui reste intrinsèquement instable.

Ainsi, dans un deuxième temps, il faut imaginer de quelle manière des gènes

exprimés à nouveau pourraient le rester de façon pérenne. Ces gènes produisent notamment des protéines de la surface des cellules intervenant dans leurs interactions. Une solution consisterait donc à faire interagir ces protéines avec des molécules adéquates présentes dans le microenvironnement. On fournirait sous forme soluble des protéines ou de petites molécules capables d'interagir avec ces protéines de surface et de déclencher la signalisation intracellulaire qui stabilise leur expression, voire l'expression génique dans son ensemble.

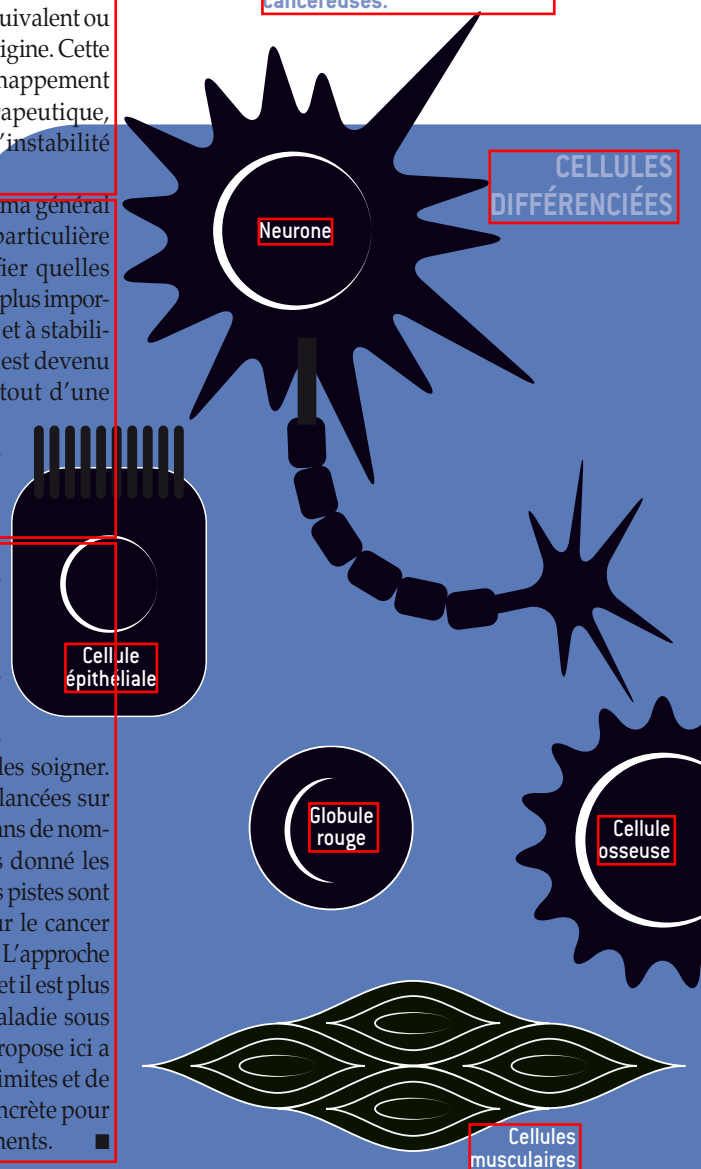
Et en combinant l'action de plusieurs molécules agissant sur diverses protéines d'interaction (de manière à imiter l'environnement normal des cellules du tissu par de pseudo-interactions), on atteindrait un état de stabilisation équivalent ou presque à l'état différencié d'origine. Cette stabilisation empêcherait l'échappement tumoral ou la résistance thérapeutique, puisque ceux-ci sont dus à l'instabilité des cellules cancéreuses.

Il s'agit bien sûr d'un schéma général qui nécessite une approche particulière à chaque pathologie : identifier quelles molécules d'interaction sont les plus importantes à exprimer de nouveau et à stabiliser selon le type cellulaire qui est devenu cancéreux. Mais il s'agit surtout d'une proposition alternative qui permettrait de sortir de l'impasse que révèle le séquençage des cellules cancéreuses.

Quand en 2001, des biologistes ont séquencé un génome humain pour la première fois, on a pensé qu'on tenait une clé pour prévenir et soigner les maladies génétiques : il suffirait de rechercher les mutations associées aux maladies pour les soigner. De multiples équipes se sont lancées sur la piste génétique. Toutefois, dans de nombreux cas, l'approche n'a pas donné les résultats escomptés, et d'autres pistes sont envisagées. Les recherches sur le cancer arrivent à un tournant similaire. L'approche génétique a montré ses limites et il est plus que temps d'aborder cette maladie sous un autre angle. Celui que je propose ici a l'avantage de contourner ces limites et de fournir une feuille de route concrète pour produire de nouveaux traitements. ■

Développement et cancer : une même histoire

Les cellules indifférenciées ont des profils instables, car l'expression de leur génome est peu contrainte, notamment à cause de leur faible réseau d'interactions. Au cours du développement et de la différenciation, la mise en place d'interactions cellulaires directes ou à distance stabilise l'expression des gènes et les phénotypes des cellules (neurone, globule rouge, etc.). Si ces interactions sont perturbées, les cellules redeviennent instables et risquent alors de se transformer en cellules cancéreuses.



Terrie Moffitt, Richie Poulton et Avshalom Caspi

On vit mieux quand on sait se contrôler dès l'enfance. C'est ce que suggère le suivi de milliers de personnes depuis la naissance. Faut-il alors entraîner les enfants à la maîtrise de soi dès leur plus jeune âge ?

Le bonheur est dans la maîtrise de soi



Et si nous pouvions suivre une population humaine sur toute une vie ? Cela permettrait d'analyser les liens entre le profil psychologique, la réussite sociale, la santé, etc. C'est ce à quoi s'attache depuis 40 ans une équipe pluridisciplinaire, que nous avons rejointe dans les années 1980, à Dunedin, en Nouvelle-Zélande.

Cette équipe étudie un peu plus de 1 000 personnes, nées entre avril 1972 et mars 1973. Elle a d'abord analysé la santé des nourrissons, puis de nombreux autres paramètres, portant notamment sur le comportement et la psychologie des participants. Des évaluations ont été mises en place tous les deux à cinq ans. Entre 2011 et 2012, 95 % des 1 007 membres survivants de l'étude, alors âgés de 38 ans, ont participé à la plus récente, subissant huit heures de tests et d'entretiens.

Nous nous sommes particulièrement intéressés à la maîtrise de soi, qui peut être définie comme la capacité de contrôler ses pensées et ses actes et qui est mesurée en

L'ESSENTIEL

■ Les chercheurs ont étudié l'évolution de divers paramètres chez des milliers de sujets, parfois suivis depuis une quarantaine d'années : santé, endettement, maîtrise de soi...

■ Ils ont montré que les enfants dotés de la meilleure maîtrise de soi réussissent mieux par la suite et sont plus heureux.

■ Ils préconisent donc de développer cette capacité chez les enfants, grâce à divers jeux et activités.

© Shutterstock.com / Daniel

pratique par une constellation de traits de caractère (voir l'encadré page 47). Cette capacité est fondamentale, mais souvent prise en défaut dans nos sociétés où les distractions et les tentations sont légion. Économiser pour sa retraite est compliqué quand nous sommes tous les jours bombardés de publicités séduisantes. Rester mince est difficile, à l'heure où des aliments délicieux et caloriques sont servis à chaque coin de rue – d'autant plus que nos métiers sont moins exigeants physiquement. La valeur de la maîtrise de soi est encore augmentée par les nouvelles pratiques des employeurs : quand ils recherchent une pépite à embaucher, ces derniers traquent les signes de cette capacité chez les diplômés, notamment sur leurs pages Facebook.

Le regain d'intérêt pour la maîtrise de soi est né d'observations récentes sur le programme social américain *Head Start*, lancé en 1965. Grâce à des services d'éducation, de santé et d'aide aux parents, ce programme visait à stimuler le développement



intellectuel de jeunes enfants pauvres qui n'étaient pas encore en âge d'aller à l'école. S'il a échoué à faire augmenter les scores aux tests de quotient intellectuel (QI), il a remporté un autre succès inattendu : chez ses bénéficiaires, on a constaté plus tard un moindre taux de grossesses à l'adolescence, d'interruption de la scolarisation, de délinquance et d'absentéisme au travail.

Le programme *Head Start* a donc développé quelque chose chez les participants, mais quoi ? Dans un article publié en 2006, James Heckman, lauréat du prix Nobel de l'économie en 2000, et ses coauteurs ont suggéré qu'il pourrait s'agir de la maîtrise de soi. Nous avons alors compris que nos données collectées pendant 40 ans constituaient un outil unique pour explorer l'importance de cette aptitude. La maîtrise de soi acquise pendant l'enfance conditionne-t-elle la santé, la prospérité et l'honnêteté futures ? Si oui, peut-elle être enseignée ? Nous nous sommes penchés sur ces questions, avec l'idée de convaincre les décideurs politiques qu'il s'agit d'un levier puissant pour combattre certains problèmes sociaux.

Dès le départ, nous savions que nous rencontrerions un certain scepticisme. Nous-mêmes n'en étions pas dépourvus. Nombre de chercheurs en sciences comportementales pensaient que les problèmes de maîtrise de soi étaient inhérents à l'enfance ; vite surmontés, ils n'auraient aucune influence sur la vie adulte. D'autres accordaient un léger intérêt aux capacités de maîtrise de soi de l'enfant, mais les estimaient bien moins déterminantes pour la suite que le QI ou la classe sociale. D'autres encore

reconnaissaient une certaine influence à ces capacités, mais les croyaient inutiles à étudier car impossibles à modifier. Enfin, certains jugeaient pertinent de s'y intéresser seulement pour le petit groupe des enfants souffrant de trouble grave du déficit de l'attention avec hyperactivité (TDAH).

Un scepticisme contredit par les résultats

Pourtant, nous avons trouvé que la maîtrise de soi dans l'enfance est fortement corrélée aux succès et à la santé futurs de l'adulte, et ce quelles que soient l'intelligence ou la classe sociale. En outre, une bonne maîtrise de soi ne semble pas nuire au bonheur.

Quand les enfants de Dunedin avaient moins de 11 ans, nous avons évalué leur maîtrise de soi à l'aide d'observations réalisées par notre équipe, de questionnaires remplis par les enseignants et d'entretiens avec les parents. Aux âges plus avancés, nous avons aussi interrogé directement les enfants. Les paramètres testés étant fortement corrélés, nous les avons regroupés en une note unique pour chaque individu. Une faible note caractérisait un manque de maîtrise de soi qui s'était manifesté dans différentes situations et pendant plusieurs années – et non pas ponctuellement, comme cela peut arriver à tous les enfants. Notons que le niveau moyen était notablement plus élevé chez les filles que chez les garçons.

On sait qu'une classe sociale élevée et une grande intelligence favorisent la réussite à l'âge adulte. Or les enfants de Dunedin dotés de la meilleure maîtrise de soi étaient aussi

souvent ceux issus de familles avantagées sur le plan socio-économique et ceux qui obtenaient les meilleurs scores de QI. Pour isoler les effets propres de la maîtrise de soi et nous assurer que la réussite constatée à l'âge adulte n'était pas due seulement à ces deux paramètres, nous avons introduit toute une série de contrôles statistiques.

L'un de nos principaux objectifs était d'étudier les problèmes de santé à l'âge adulte. Pour ce faire, nous avons examiné les participants à la trentaine. Nous avons évalué l'obésité, l'hypertension, l'état des poumons... Nous avons aussi réalisé des analyses de sang pour doser le cholestérol et rechercher des infections sexuellement transmissibles, ainsi que des protéines trahissant une inflammation systémique.

Nous avons synthétisé ces résultats par un indice de santé physique pour chaque membre de l'étude. Quelque 43 % des sujets n'avaient aucun souci pour les paramètres testés, tandis que 20 % présentaient au moins deux déficiences. La maîtrise de soi lors de l'enfance permettait de prédire le nombre de ces problèmes de santé à l'âge adulte (voir la figure page 48). Nous avons aussi évalué la dépendance aux drogues ou à l'alcool, en interrogeant d'abord les membres de l'étude, puis certains de leurs proches pour obtenir un témoignage plus objectif. Une fois adultes, les enfants qui avaient eu une faible maîtrise de soi présentaient un risque élevé de toxicomanie et étaient dépendants à un plus grand nombre de substances.

Outre la santé, nous avons étudié les difficultés financières : faibles revenus, épargne limitée, endettement et dépendance aux aides



UNE POPULATION SUIVIE TOUTE UNE VIE ?

C'est le principe d'une étude réalisée à Dunedin, en Nouvelle-Zélande. Plus de 1 000 personnes ont été suivies pendant près de 40 ans. Depuis leur naissance, elles passent une batterie d'exams physiques et psychologiques tous les deux à six ans.

sociales. Tous ces paramètres sont des signes d'alerte précoce, qui annoncent un risque de pauvreté à un âge avancé. Là encore, la maîtrise de soi dans l'enfance laissait présager la situation des sujets de l'étude à la trentaine. Plus cette capacité avait été faible, moins les sujets adultes avaient d'économies et de patrimoine, et plus ils affrontaient des difficultés financières. C'est ce qu'ont révélé des entretiens individuels et des dossiers administratifs. Ainsi, l'étude des données de l'Agence de crédit VEDA a montré que les sujets dotés de la plus faible maîtrise de soi durant l'enfance risquaient plus d'être classés comme « à risque » à l'âge adulte et de se voir refuser l'octroi d'un crédit.

Avec l'aide du personnel gouvernemental néo-zélandais, nous avons comptabilisé les allocations sociales accordées. Plus de la moitié de la cohorte a bénéficié à un moment donné de telles aides. Les scores de maîtrise de soi prédisaient peu quels membres du groupe de Dunedin en avaient reçu, indiquant qu'une grande variété de personnes rencontrent des difficultés, en particulier en ces temps de crise économique. Cependant, la durée pendant laquelle les aides étaient perçues était d'autant plus longue que la maîtrise de soi pendant l'enfance était faible: moins de 18 mois en moyenne pour les

Qu'est-ce que la maîtrise de soi ?

La maîtrise de soi est souvent caractérisée... par son absence ! Un

ensemble de traits de caractère révèle quand cette capacité est prise à défaut (voir la liste ci-dessous). Les conséquences sanitaires et sociales en sont multiples, avec par exemple un risque accru de tabagisme, de suralimentation et de transgression des lois.

Selon des études par imagerie fonctionnelle (IRM), la maîtrise de soi est liée à des structures cérébrales du cortex frontal. Elle est soumise à des influences à la fois génétiques et environnementales. Dans l'étude *E-risk*, nous avons trouvé qu'à l'âge de cinq ans, des jumeaux génétiquement identiques ont une maîtrise de soi plus voisine que des faux jumeaux. Cela suggère un rôle de certains gènes, qui restent à identifier. Cependant, même entre vrais jumeaux, la maîtrise de soi demeure assez différente, ce qui indique d'importantes influences non génétiques. Tout n'est donc pas fixé à la naissance et des psychologues ont montré que les jeunes enfants peuvent développer leur maîtrise de soi.

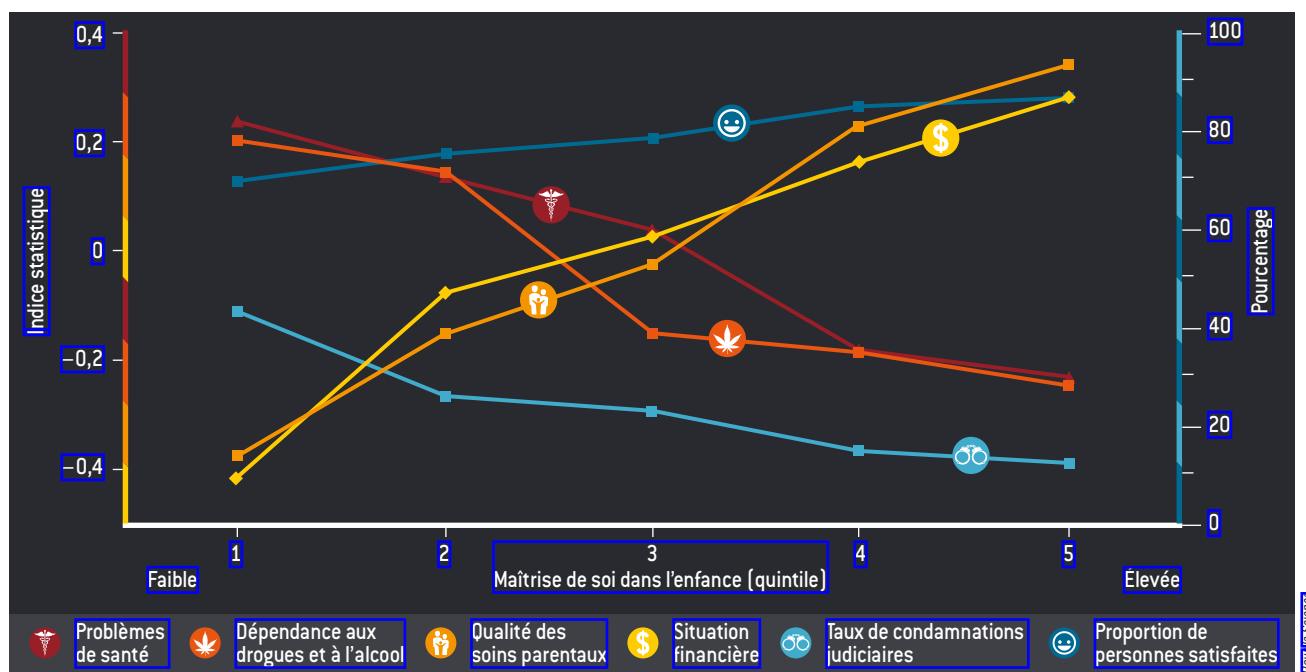
Les critères du manque de maîtrise de soi



- instabilité émotionnelle
- propension à sortir de ses gonds
- faible tolérance à la frustration
- manque de persévérance
- courte durée d'attention
- tendance à être facilement

distrait

- passage d'une activité à une autre
- agitation
- hyperactivité
- impulsivité
- action avant la réflexion
- difficulté à attendre
- difficulté à attendre son tour



LES ENFANTS DOTÉS DE LA PLUS FAIBLE MAÎTRISE DE SOI s'occupent par la suite moins bien de leur propre progéniture (courbe orange clair), ont une moins bonne situation financière (jaune) et ont plus de problèmes de santé (rouge) et de dépendance (orange foncé). Sur les courbes ci-dessus, ces paramètres sont quantifiés par un indice statistique caractérisant l'écart à la moyenne (les notes posi-

tives sont au-dessus de la moyenne). En outre, le manque de contrôle entraîne un plus grand nombre de condamnations judiciaires (bleu clair). À l'inverse, les enfants qui se contrôlent le mieux seront plus nombreux à se déclarer satisfaits de leur vie par la suite (bleu foncé). Ces effets persistent même après la prise en compte des différences de QI, de classe sociale et de sexe.

20 % qui avaient la meilleure maîtrise de soi, contre plus de six ans pour le dernier quintile (les 20 % les plus faibles pour cette aptitude) de la cohorte.

Nous avons également examiné les condamnations judiciaires. La lutte contre le crime (prévention, interpellations, procès, incarcération, etc.) est coûteuse pour la société : aux États-Unis, par exemple, les dépenses ont été estimées à 10 % du produit intérieur brut, presque autant que celles allouées à la santé. Nous avons trouvé les condamnations prononcées contre les sujets de l'étude dans le fichier central informatisé de la police néo-zélandaise. À la trentaine, un quart des sujets avaient déjà été condamnés (un chiffre comparable à celui d'autres pays développés) et 5 % incarcérés. Plus la maîtrise de soi pendant l'enfance était faible, plus la probabilité d'être condamné était forte. Plus de 80 % des sujets incarcérés appartenaient aux deux quintiles les plus bas pour cette capacité.

Les effets étaient particulièrement marqués aux extrémités du panel. Au sein du quintile doté de la meilleure maîtrise de soi pendant l'enfance, seuls 10 % percevaient un revenu annuel inférieur au seuil de pauvreté et 13 % avaient été condamnés,

contre respectivement 32 % et 43 % dans le quintile le plus bas.

L'étude de Dunedin a permis d'analyser l'influence de la maîtrise de soi non seulement sur les participants, mais aussi sur leurs enfants. En 2012, les trois-quarts des 1 037 sujets étaient parents. Lorsque le premier enfant d'un participant atteignait 3 ans, notre équipe rendait visite à la famille pour enregistrer les interactions des parents et de leur progéniture au cours d'un ensemble standardisé d'activités. Des psychologues familiaux, ignorant tout du reste de l'étude, visionnaient ensuite les vidéos pour évaluer certains aspects de la parentalité, notamment l'affection portée à l'enfant et la sensibilité à ses besoins.

Un défaut qui pénalise la génération suivante

Là encore, les résultats sont édifiants : plus les participants avaient une grande maîtrise de soi pendant l'enfance, mieux ils s'occupaient de leur propre progéniture, et moins leur famille risquait d'être monoparentale. Ces résultats impliquent que la faible maîtrise de soi d'une génération désavantage la génération suivante.

En résumé, les participants dotés d'une faible maîtrise de soi pendant l'enfance devenaient moins prospères, moins en forme, moins honnêtes et moins bons parents. Pour vérifier la robustesse de nos corrélations, nous avons répété les analyses après avoir exclu les enfants du quintile le plus bas et ceux du plus élevé, puis les 61 membres diagnostiqués comme souffrant de troubles graves du déficit de l'attention avec hyperactivité. Nous avons là encore observé d'importantes corrélations, indiquant que les résultats ne dépendent pas d'un groupe extrême ou particulier.

À partir de quel âge la maîtrise de soi est-elle un bon indicateur de la qualité de vie future et quand les premiers problèmes apparaissent-ils ? Les évaluations réalisées lorsque les enfants avaient trois à cinq ans permettaient de prédire les observations à la trentaine avec une bonne fiabilité – bien qu'un peu moins bonne qu'en utilisant les scores moyennés sur toute la première décennie. Dès l'adolescence, les personnes dotées d'une faible maîtrise de soi avaient une propension supérieure à faire des « erreurs ». Ainsi, elles étaient plus nombreuses à fumer, à quitter l'enseignement secondaire sans diplôme et à avoir un enfant non désiré.

De façon générale, moins elles avaient de maîtrise de soi en tant qu'enfants, plus elles manifestaient à l'adolescence des signes annonciateurs de troubles à l'âge adulte.

Nous avons également analysé un groupe dit utopique, ne comprenant que des diplômés non fumeurs et aucun parent adolescent. Par comparaison avec la totalité de la cohorte, ce groupe qui avait eu une adolescence plus tranquille présentait à l'âge adulte de meilleurs scores pour les critères de santé, de richesse et d'antécédents judiciaires. Cela suggère que des mesures de prévention seraient efficaces pendant cette période difficile. Cependant, même au sein du groupe utopique, les scores étaient d'autant plus élevés que les capacités de maîtrise de soi avaient été fortes pendant l'enfance. L'enseignement de ces capacités avant dix ans compléterait donc avantageusement la prévention à l'adolescence.

Les résultats de l'étude de Dunedin sont robustes, mais ils comportent une faiblesse : chaque membre a grandi dans une famille différente, et de multiples paramètres peuvent intervenir. Nos résultats

n'étaient-ils pas influencés par des variables non mesurées ?

Pour le vérifier, nous avons étudié une cohorte britannique de 2 232 jumeaux, que nous avons suivis depuis leur naissance (étude *E-risk*, ou *Environmental-Risk Longitudinal Twin Study*). Les jumeaux grandissant dans la même famille, on peut analyser l'influence de la maîtrise de soi indépendamment des paramètres familiaux. Nous avons étudié 509 paires de faux jumeaux de même sexe, car contrairement aux vrais jumeaux, ils ont autant de différences de maîtrise de soi que des frères et sœurs ordinaires.

Lorsque les jumeaux de l'étude *E-risk* ont eu cinq ans, nous avons évalué leur maîtrise de soi de la même façon que pour les enfants de Dunedin. Bien qu'à l'heure où nous écrivons ces lignes, ils n'ont été suivis que jusqu'à 12 ans, les premiers résultats corroborent ceux de l'étude de Dunedin. Nous avons montré que celui des deux jumeaux qui a la plus faible maîtrise de soi à cinq ans risque plus de fumer à 12 ans, d'avoir des résultats médiocres à

LES AUTEURS



Terrie MOFFITT est professeur de psychologie à l'Université Duke, aux États-Unis, et au King's

College, à Londres.



Richie POULTON est directeur de l'Unité de recherche pluridisciplinaire pour la santé

et le développement, à l'École de médecine de Dunedin, en Nouvelle-Zélande.



Avshalom CASPI est professeur de psychologie à l'Université Duke, aux États-Unis, et au King's

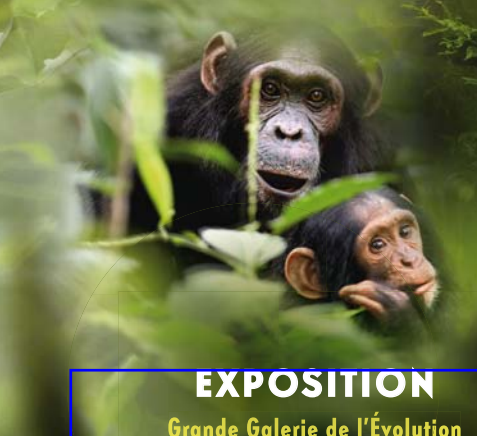
College, à Londres.

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

SUR LA PISTE DES

GRANDS SINGES

ORANG-OUTAN • GORILLE • CHIMPANZÉ



EXPOSITION

Grande Galerie de l'Évolution
Jardin des Plantes, Paris 5^e — Jusqu'au 21 mars 2016

GRANDSSINGES.FR

Dans le cadre de l'exposition
Les Rendez-vous du Muséum
vous présentent

UNE EXPO / DES DÉBATS

SUR LA PISTE DES GRANDS SINGES
UN PROJET DE CENTRE
D'ÉDUCATION PÉDAGOGIQUE

LUNDI 13 AVRIL à 18h

Avec Sabrina Krief, primatologue
et Marine Cibot, doctorante
en éco-éthologie au Muséum,
à l'auditorium de la
Grande Galerie de l'Évolution.
Entrée gratuite.





© Jean-Michel Krief

l'école et d'avoir une conduite antisociale, par exemple en volant et en se bagarrant.

Un autre résultat de l'étude *E-risk* témoigne du coût sociétal d'une mauvaise maîtrise de soi. Les enseignants jugeaient que le jumeau ayant un bas niveau de contrôle requerrait plus d'efforts de leur part en classe et contribuait parfois à leur sentiment d'insatisfaction et de découragement.

Les enfants qui ont une bonne maîtrise de soi réussissent mieux dans la vie et coûtent moins cher à la société, mais sont-ils heureux ? Certains les imaginent rigides et sans spontanéité, et craignent que le développement de la maîtrise de soi nuise au bonheur.

Une des clefs du bonheur

Interpellés par cette inquiétude, nous avons examiné des indicateurs de satisfaction chez les sujets de notre étude. Quelque 70 % d'entre eux se sont dits assez ou très satisfaits de leur vie. Toutefois, les plus satisfaits étaient ceux qui avaient une grande maîtrise de soi pendant l'enfance (la proportion montait à près de 90 % pour ce groupe). C'étaient aussi ceux qui avaient le plus faible taux de suicide. Parmi les participants du quintile le plus bas pour la maîtrise de



LA MAÎTRISE DE SOI PEUT S'APPRENDRE et de nombreux projets visent à la développer. Par exemple, le programme « Pour toi, pour moi, pour plus tard » est fondé sur l'univers de la série télévisée *Sesame Street*. La capture d'écran ci-dessus montre une vidéo où Elmo (la marionnette rouge) apprend à économiser de l'argent pour acheter un jouet.

soi, 22 % avaient déjà fait une tentative de suicide à l'âge de 38 ans, contre seulement 7 % pour le quintile le plus élevé.

Rejoignant des études antérieures, nos résultats impliquent que l'enseignement de la maîtrise de soi pourrait réduire les coûts liés aux services de santé, à la lutte contre la criminalité et à l'éducation. Il préserverait aussi les générations suivantes de multiples déficits parentaux. Agir sur cette capacité est d'autant plus tentant qu'elle annonce les résultats à l'âge adulte à peu près aussi bien (et parfois mieux) que l'intelligence et l'origine sociale, bien plus difficiles à moduler.

Mais est-il possible de développer la maîtrise de soi ? Brent Roberts de l'Université de l'Illinois, a montré qu'elle peut effectivement évoluer. Dans l'étude de Dunedin, les scores de maîtrise de soi variaient deux fois plus que ceux des tests de QI. Pour certains participants, le fait de devenir dirigeant et de superviser d'autres employés en était une des causes. Ceux qui accédaient aux responsabilités avaient déjà une bonne maîtrise de soi, ce qui explique probablement leur promotion, mais leur score augmentait particulièrement vite ensuite.

Des programmes visant à augmenter la maîtrise de soi des jeunes enfants ont été élaborés et beaucoup se révèlent prometteurs. Par exemple, sur Internet, le programme multimédia « Pour moi, pour toi, pour plus tard », qui exploite l'univers de la série télévisée américaine *Sesame street* (« 1, rue Sesame » en France), apprend aux enfants d'âge préscolaire à retarder une récompense en économisant de l'argent dans un but précis ; il comprend des vidéos et divers jeux et activités. Certains projets sont fondés sur l'apprentissage des arts martiaux ou de la musique, d'autres sur la pratique de jeux vidéo... Même l'apprentissage d'une langue étrangère développe la maîtrise de soi. Des programmes appliqués à l'école enseignent aux enfants à planifier quelque chose, à le mettre en œuvre puis à en faire une analyse critique. D'autres projets ciblent les parents, à qui on enseigne comment augmenter la maîtrise de soi de leur enfant.

Ces programmes restent cependant à perfectionner et à valider à grande échelle. Leurs effets à long terme doivent aussi être confirmés, et leurs aspects économiques évalués.

Nos résultats plaident pour une stratégie en deux temps, avec des interventions à la

Agir plutôt sur l'entourage ?

Les résultats des auteurs corroborent ceux de Walter Mischel, de l'Université Columbia, et de ses collègues, publiés en 1989. Ces psychologues ont mesuré la maîtrise de soi d'enfants âgés de trois à cinq ans à l'aide du « test du marshmallow ».

Le principe est de laisser le choix entre une récompense immédiate mais peu avantageuse (un marshmallow dans une assiette) et une récompense plus importante mais différée (un deuxième marshmallow si celui de l'assiette n'a pas été mangé avant le retour de l'expérimentateur, qui s'est préalablement éclipsé). Les enfants qui résistaient le moins longtemps à l'envie de manger le marshmallow étaient aussi ceux qui, plus tard, allaient le moins à

l'université, consommaient le plus de drogues, etc. Cependant, plutôt que de corriger *a posteriori* le manque de maîtrise de soi par un entraînement, mieux vaudrait s'attaquer à ses origines. En 2013, Celeste Kidd et ses collègues, à Rochester, ont révélé une influence notable de la confiance accordée aux autres. Les psychologues ont d'abord informé des enfants de trois à cinq ans qu'on allait leur apporter une corbeille remplie de

crayons de couleur, ce qui s'est révélé vrai pour la moitié d'entre eux (entourage fiable) mais faux pour l'autre moitié (entourage non fiable). Les enfants confrontés à un entourage fiable se contrôlaient mieux par la suite : ils résistaient 12 minutes au test du marshmallow, contre trois minutes pour les autres.

La priorité est alors peut-être d'agir sur l'environnement quotidien des enfants, en particulier sur la fiabilité et le caractère prévisible des réponses des adultes. Ainsi, on pourrait favoriser un état d'esprit plus compatible avec l'adoption et la tenue d'objectifs à long terme.

— François Maquestiaux
Université de Franche-Comté

fois lors de la petite enfance et à l'adolescence. D'une part, la qualité de vie à l'âge adulte dépend en partie des erreurs commises à l'adolescence, d'où l'importance de prévenir ces dernières. D'autre part, la maîtrise de soi dans l'enfance prédit la propension à commettre des erreurs à l'adolescence, qui pourrait donc être atténuée grâce à des mesures précoces.

Même à l'âge adulte, la maîtrise de soi peut être améliorée. Des psychosociologues ont montré qu'à l'instar d'un muscle, cette capacité se renforce quand on l'entraîne, mais qu'elle est diminuée par le stress, l'alcool ou la fatigue.

L'étude de Dunedin et l'étude *E-risk* sont des projets de longue durée, qui n'ont pas fini de nous renseigner sur la maîtrise de soi. Leurs membres continueront d'avancer en âge et, nous l'espérons, d'accepter de participer à chaque nouvelle collecte de données. Le grand don à la science de ces personnes est leur collaboration leur vie durant à ces travaux.

Jusqu'ici, nous avons négligé l'imagerie cérébrale, mais nous allons bientôt y

remédier. Nous avons prévu d'analyser les variations structurelles au sein du cerveau des sujets de l'étude. Nous utiliserons aussi l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), notamment pour analyser les supports cérébraux de la maîtrise de soi. Plus tard, nous étudierons la façon dont les participants vivent la ménopause, les pertes de mémoire, l'accession au stade de grands-parents et la retraite.

À notre époque, le nombre d'enfants tend à diminuer et celui de personnes âgées à augmenter. On s'attend à ce que cette tendance se poursuive et les jeunes travailleurs devront alors soutenir de plus en plus de retraités. Ainsi, la valeur que la société place sur chaque enfant et les contributions qu'elle attend de lui augmenteront. Ces changements démographiques augmentent la valeur de la maîtrise de soi. Les deux cohortes que nous étudions, nées dans des pays différents et pendant des décennies différentes, suggèrent fortement que le développement de cette capacité se révélera essentiel pour la santé, la richesse, la sécurité et le bonheur de l'humanité. ■

BIBLIOGRAPHIE

Enhancing and Practicing Executive Function Skills with Children from Infancy to Adolescence, Center on the Developing Child at Harvard University.
<http://developingchild.harvard.edu/>

R. F. Baumeister et J. Tierney, *Willpower : Rediscovering the Greatest Human Strength*, Penguin Books, 2011.

B. J. Casey *et al.*, Behavioral and neural correlates of delay of gratification 40 years later, *PNAS*, vol. 108, pp. 14 998-15 003, 2011.

A. Diamond, Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old, *Science*, vol. 333, pp. 959-964, 2011.

I. E. Moffitt *et al.*, A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety, *PNAS*, vol. 108, pp. 2693-2698, 2011.



LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

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

SCIENCE

COURS PUBLICS Cycle : Histoire de l'Homme : une préhistoire africaine

Jeudi 2 avril – 18h
Le Middle Stone Age, une époque moderne de la pierre en Afrique

Jeudi 9 avril – 18h
Diffusion, migration, transition : dynamiques des changements comportementaux dans la préhistoire africaine
D. Pleurdeau, préhistorien, maître de conférences, Muséum.

Grand Amphithéâtre du Muséum — 57 rue Cuvier, Paris 5^e

MÉTIERS DU MUSÉUM

Dimanche 26 avril – 15h : Océanographe, J.-M. Verstraete.

FILMS Cycle : Carte-blanc à Olivia Mokiejewski

Samedi 18 avril – 15h30 : Soleil vert
Réal. : R. Fleischer (1973, 93')
Projection suivie d'échanges avec O. Mokiejewski, journaliste spécialisée dans l'économie de l'environnement et F. Nicolino, journaliste.

Samedi 25 avril – 15h30 : Le projet NIM
Réal. : J. Marsh (2012, 99')
Projection suivie d'échanges avec O. Mokiejewski, journaliste et E. Grundmann, biologiste, naturaliste et reporter animalière française.

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

Quand l'eau met le feu aux volcans

Michel Detay

Lorsque le magma remonte des profondeurs de la Terre, l'eau qu'il contient se transforme en vapeur. L'énorme volume alors occupé par ce gaz explique pourquoi les éruptions volcaniques sont avant tout une histoire d'eau.



EN 2010, LE VOLCAN ISLANDAIS EYJAFJÖLL est entré en éruption sous le glacier qui le recouvrait. La rencontre du magma (au second plan, une fontaine de lave) et des glaces (au premier plan, recouvertes de cendres) ont entraîné une série d'énormes explosions.

Le 18 mai 1980, un séisme déclenche l'effondrement de toute la face Nord du mont Saint Helens. Brusquement, le magma de ce volcan du Nord-Ouest des États-Unis se retrouve à la pression atmosphérique. La vapeur d'eau qu'il contient se décomprime brutalement, ce qui projette dans l'atmosphère 1,2 kilomètre cube de roches... Classée au cinquième rang sur l'échelle d'explosivité volcanique qui en comprend huit, l'explosion dite plinienne du mont Saint Helens libère une énergie équivalente à 27 000 bombes de Hiroshima. Et tout cela en raison d'un détail : l'eau que contenait le magma du volcan.

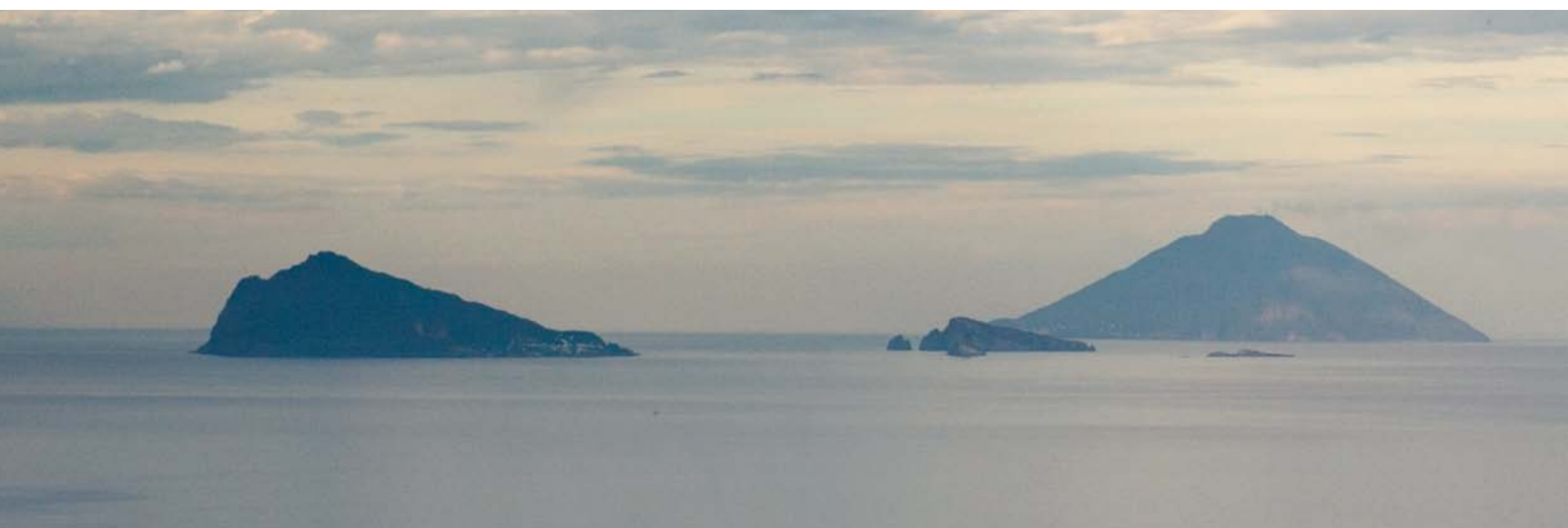
L'eau et le feu... Dans la philosophie naturelle d'Aristote, ces deux éléments sont des contraires. Est-ce la raison pour laquelle ils explosent parfois quand, dans

d'autres classifications, telle l'opposition entre volcans rouges et gris, ou encore entre volcans effusifs et explosifs...

Toutefois, l'étude des volcans actifs a montré qu'un édifice volcanique peut d'une éruption à l'autre, voire au cours d'une même éruption, passer d'une activité rouge à grise, changer de style éruptif ou devenir explosif alors qu'il était effusif... Ainsi, en 2010, le volcan islandais Eyjafjöll a bloqué l'espace aérien européen en passant d'un style d'éruption effusif à un style explosif (*voir la photographie pages 52-53*). De même, la Soufrière-Hills de Montserrat, dans les Antilles, a connu depuis 1995 pratiquement tous les styles éruptifs possibles. Ces styles ne sont donc guère caractéristiques d'un volcan, mais uniquement d'une phase de l'éruption.

phénomène qui est contrôlé par la vitesse de la remontée. Bref, nos connaissances volcanologiques actuelles ont rendu largement obsolètes les classifications anciennes.

Pourquoi ? Essentiellement parce que l'étude physico-chimique des fluides géologiques a permis de comprendre que les éléments volatils du magma (les gaz) jouent un rôle essentiel dans le mécanisme éruptif. Or l'eau est le plus abondant des volatils, de sorte que pour appréhender le mécanisme éruptif, il faut s'intéresser de près au rôle qu'elle joue dans la formation des magmas et dans leur ascension jusqu'à la surface. En effet, l'eau et les fluides géologiques jouent un rôle majeur non seulement dès le stade de la genèse du magma, mais aussi tout au long de sa remontée. Ce sont en particulier la quan-



un volcan, la nature les mêle à la terre et à l'air ? Nous allons examiner cette question en nous appuyant sur les considérations physico-chimiques de la volcanologie moderne, plutôt que sur la philosophie naturelle des Anciens : nous verrons en particulier que les grands responsables des dynamiques éruptives sont la vapeur d'eau et les autres gaz magmatiques.

Longtemps, la volcanologie n'a été qu'une science d'observation. Sans doute est-ce pourquoi son vocabulaire et ses concepts restent souvent éloignés des explications physico-chimiques... Les volcanologues ont ainsi décrit de nombreux styles éruptifs – hawaïen, strombolien, vulcanien, péléen, plinien, fissural, islandais, etc. – pour ne, finalement, garder que les cinq premiers. Ils ont aussi créé

L'opposition entre « volcans rouges », qui produisent une lave fluide, et « volcans gris », qui émettent des produits pyroclastiques lors d'éruptions violentes, semble aussi réductrice. Si chaque style est associé à certains types de produits éruptifs, un volcan ne développe jamais exactement les mêmes types de lave au cours de sa période d'activité.

Les classifications anciennes obsolètes

De même, si l'on s'est longtemps concentré sur le volume de gaz émis au cours d'une éruption, il semble que ce qui influence vraiment son déroulement est la façon dont le gaz s'exsolv (se sépare) de la roche en fusion lors de l'ascension du magma,

la teneur en eau dissoute dans le magma et la manière dont la vapeur se sépare de la phase solide, qui contrôlent les régimes éruptifs. L'hydrovolcanologie est donc une partie essentielle de la volcanologie.

Depuis que les astronautes ont observé notre planète de l'espace, elle a pris le nom de « planète bleue », tant l'eau y abonde : 71 % de la surface terrestre est couverte d'océans. Mais ce que l'on a omis de considérer, c'est que la majorité des planchers océaniques sont de nature volcanique. Sur les terres émergées, on dénombre environ 1 500 volcans qui ont été actifs au cours de l'Holocène (les 10 000 dernières années). Or sur le plancher océanique, il y aurait, estime-t-on, au moins 1,5 million d'édifices volcaniques. Notre planète océane est aussi une planète volcan ! Pour preuve, sur Terre,

Les roches d'origine magmatique l'emportent largement sur les roches sédimentaires.

Pouvons-nous en conclure que nous marchons sur un océan de magma sur lequel flotterait la croûte terrestre ? Non. L'idée que la matière constituant le manteau terrestre (les 2885 kilomètres séparant la croûte du noyau de la Terre) est en fusion est fautive. Nous ne marchons pas sur un océan de magma, et il n'y a pas de « feu central », car les roches qui constituent le manteau sont à l'état solide. Étant donné l'augmentation de la pression et de la température avec la profondeur, la fusion, même partielle, des roches du manteau – des péridotites, formées de silicates de fer (10 %) et de magnésium (90 %) – est impossible.

Pour autant, une énorme masse d'eau, estimée à l'équivalent de deux à trois hydros-

L'AUTEUR



Michel DETAY est géologue et volcanologue de terrain. Il a observé et photographié un grand nombre de volcans.

LES ÎLES ÉOLIENNES,

ici Panarea et Stromboli, sont des volcans sous-marins qui ont fini par émerger. L'eau conditionne leur volcanisme, puisque ces îles sont nées de la subduction sous-marine de la plaque africaine sous la plaque européenne.

Voyons comment. Le magma primaire, celui qui apparaît loin en profondeur sous la croûte, se forme par fusion partielle à partir des péridotites. *A priori*, se dit-on, ce matériau fond quand la température s'élève, par exemple quand la convection fait remonter des roches profondes et très chaudes, donc moins denses. Toutefois, la hausse de la température ne joue qu'un rôle mineur par rapport à celui de la baisse de pression qui accompagne la remontée.

Franchir le solidus

En effet, pour qu'une roche fonde, il faut soit augmenter sa température, soit abaisser la pression qu'elle subit. Cela revient à dire que sur la carte de tous ses états physiques possibles – son « diagramme de phase » – il

phères, soit deux ou trois fois 10^{21} kilogrammes – est dissoute dans le manteau. Cette eau s'y trouve soit sous sa forme moléculaire habituelle (H_2O), soit sous la forme d'ions hydroxydes (OH^-) attachés aux silicates des roches. Ainsi, l'eau peut faire partie de la formule chimique de certains minéraux, où l'ion OH^- est intégré dans la structure cristalline. C'est le cas dans les amphiboles, la lawsonite, la chlorite, etc. Ces deux derniers minéraux contiennent ainsi 14 % d'eau.

On trouve aussi de l'eau dans des minéraux anhydres tels que l'olivine ou le quartz, car il arrive que leur structure intègre des défauts ponctuels contenant de l'eau. Quelle que soit son origine, l'eau des profondeurs influe de façon cruciale sur les propriétés physico-chimiques du manteau supérieur.

L'ESSENTIEL

■ Un volcan peut changer de style éruptif au cours d'une même période d'activité, voire d'une même éruption.

■ Le phénomène est lié aux composés volatils contenus dans le magma, dont l'eau.

■ Jusqu'à 90 % du volume des gaz volcaniques est de la vapeur d'eau.

■ L'eau et les autres composés volatils finissent par occuper plus de 90 % du volume éruptif, ce qui rend l'éruption explosive pendant sa première phase au moins.

STYL. PATRICK CONTREAU. LES PHOTOGRAPHIES SONT DE MICHEL DETAY.

faut lui faire franchir le *solidus*, la courbe tracée par ses points de fusion en fonction de la pression et de la température (voir la figure page 59). Le solidus est donc la courbe qui sépare la région du diagramme où la roche est à l'état purement solide de celle où elle est partiellement fondue.

On constate que, à pression donnée, la température de fusion d'un type de roche est plus basse quand cette roche est hydratée ou contient de l'eau. En d'autres termes, au cours de la baisse de pression accompagnant leur remontée, les roches hydratées franchiront plus facilement le solidus que les roches sèches (voir la figure page 59). Ainsi, l'addition à une roche de seulement 1 % d'eau abaisse son point de fusion d'environ 100 °C. La température d'une roche variant peu au cours de sa



CES CINQ VOLCANS GÉANTS du Kamtchaka font partie des quelque 1 500 volcans terrestres qui ont été actifs au cours des 10 000 dernières années. Phénomène rare, ils sont entrés simultanément en éruption en janvier 2013.

© J. ROBERT - IMAGO

remontée, il y aura donc plus facilement fusion partielle en présence d'eau ou lorsque la pression diminue. Ces deux mécanismes de déclenchement de la fusion partielle sont de loin les plus fréquents.

Lorsque la roche commence à fondre, un liquide interstitiel apparaît. De 20 à 30 % seulement de la masse de roche-mère est susceptible de fondre. Plus chaud et moins dense que le solide environnant, le liquide formé tend à remonter vers la surface (voir l'encadré page 58). Son ascension dure généralement des milliers, voire des centaines de milliers d'années, mais il arrive dans certains cas que sa durée n'excède pas quelques mois. Ce sont en fait des volumes de magma – ce que l'on nomme des diapirs – qui remontent. Les lampes à lave, ces lampes décoratives à l'intérieur desquelles des « bulles » de cire fondue se distinguent d'une masse avant de remonter très lentement donnent une idée de l'ascension d'un diapir.

Un magma riche en eau

Due à la différence entre la densité du manteau et celle de la croûte, la poussée d'Archimède subie par le diapir tend à diminuer au fil de la remontée. Un équilibre (temporaire) entre cette poussée et les forces de pression finit par s'établir, et un réservoir de magma se forme, typiquement à plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres de profondeur (voir l'encadré page 58). C'est là, dans la chambre magmatique, que les substances volatiles vont commencer à jouer un rôle.

Les gaz volcaniques émis par les volcans sont, par ordre d'importance, composés d'eau (50 à 90 %), de dioxyde de carbone (CO_2 , 5 à 25 %) et de dioxyde de soufre (SO_2 , 3 à 25 %). Viennent ensuite d'autres composés volatils en bien plus faibles proportions, tel le monoxyde de carbone (CO), l'acide chlorhydrique (HCl), le dihydrogène (H_2), l'hydrogène sulfuré (H_2S), l'acide fluorhydrique (HF), le soufre (S_2 est la forme dominante à haute température) et l'hélium (He)... (voir l'exemple ci-contre).

Ces gaz volcaniques sont libérés en des proportions variables selon la température et la composition du magma, non seulement pendant l'éruption à proprement parler, mais aussi à la faveur des phénomènes pré- et postéruptifs, tels les fumerolles ou encore les solfatares. Leur apparition et augmentation pendant la

phase pré-éruptive sont des signes forts de maturation et d'ascension de magma, raison pour laquelle les gaz volcaniques constituent un indice de grand intérêt pour la prévision de l'activité volcanique.

L'eau est le principal composé volatil des magmas, le dioxyde de carbone et les autres gaz étant moins solubles. Cela n'empêche pas que les émissions volcaniques de dioxyde de carbone et de dioxyde de soufre jouent un rôle climatique significatif lors des éruptions majeures. Tous ces composés volatils trouvent leur origine dans la composition des roches mantelliques, c'est-à-dire des péridotites. Ils se dégagent progressivement de leur matrice minérale en fonction des conditions ambiantes de pression et de teneur en eau.

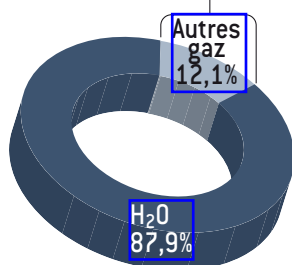
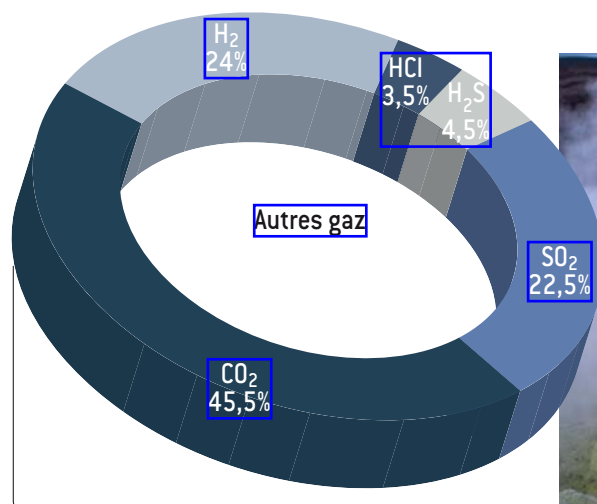
Les magmas terrestres peuvent renfermer jusqu'à 10 % de leur masse en eau. Ces concentrations extrêmes se rencontrent

dans les séries magmatiques des zones de subduction, puisque les plaques plongeantes (voir la figure de l'encadré page 58) sont saturées d'eau; ailleurs, des valeurs de 4 % à 5 % sont fréquentes. D'une manière générale, on trouve 1 % d'eau dans des basaltes, 2 à 3 % dans les andésites et jusqu'à 7 % d'eau dans les rhyolites. Toutefois, il s'agit là d'eau encore constitutive de ces roches, après que les magmas dont elles sont issues ont dégazé. Le magma qui leur a donné naissance était donc plus riche en eau, d'autant plus que le dégazage aura été important.

L'eau a une influence considérable sur les propriétés physiques et chimiques des magmas. Après la fusion partielle, la présence d'eau dans les liquides silicatés a aussi une grande influence sur l'ascension des liquides magmatiques, sur leurs dégazages, sur la cristallisation qui se produit en leur sein

© NASA, ROBERT S. MIMOT

NAISSANCE D'UNE ÎLE : exemple de volcanisme sous-marin, l'île de Nishino-shima shinto a émergé de la surface du Pacifique en novembre 2013. Émettant sans cesse des laves, elle a grossi jusqu'à toucher l'île voisine de Nishino.



LA COMPOSITION DES GAZ MAGMATIQUES dans le cas d'un basalte tholéiitique de l'île de Surtsey, en Islande. Les valeurs sont rapportées en pourcentages de moles. Dans les magmas, l'eau est de loin le composé volatil le plus abondant, suivie du dioxyde de carbone. Ci-contre, un solfatar sur Vulcano, l'une des îles éoliennes; de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone, du dioxyde de soufre ainsi que du soufre diatomique s'échappent.



et sur leur viscosité. Quelques pour cent d'eau suffisent à abaisser la viscosité d'un magma de plus de six ordres de grandeur, c'est-à-dire à la diviser par 1 000 000 !

Au cours du processus de cristallisation fractionnée, des minéraux hydroxylés (amphiboles, micas) se forment en fixant des ions hydroxyles (OH^-), donc de l'eau. Les amphiboles, par exemple, sont stables dans une gamme de pression allant jusqu'à deux ou trois gigapascals (20 000 à 30 000 atmosphères). Elles contiennent environ 2 % d'eau. Lors de la cristallisation des amphiboles, le magma résiduel s'appauvrit en eau.

Toutefois, les amphiboles sont susceptibles de se déstabiliser pendant la remontée avec l'évolution des conditions thermodynamiques, par exemple quand la pression baisse ou quand la température augmente à la suite d'une réalimentation de la chambre magmatique. Elles libèrent alors leur eau dans le magma. Ce phénomène constitue un apport d'eau considérable. Des travaux expérimentaux ont indiqué que cette libération se produit lors de la remontée du magma

BIBLIOGRAPHIE

C. Martel, *Les crises de la montagne Pelée*, Pour la Science n° 439, 2014.

M. Detay et A.-M. Detay, *Volcans. Du feu et de l'eau*, Belin, 2013.

M. Detay et P. Thomas, *Hydrovolcanologie appliquée à la phase hydrothermale*, 2013 : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/hydrovolcanologie.xml>

J.-M. Bardintzeff, *Volcanologie*, Dunod, 2011.

E. A. Parfitt et L. Wilson, *Fundamentals of physical volcanology*, Blackwell Publishing, 2008.

C. Jaupart et al., *Le volcanisme, cause de mort et source de vie*, Vuibert-MNHN, 2003.

H. Sigurdsson, *Encyclopedia of volcanoes*, Academic Press, 2000.

à une profondeur de 5000 à 8000 mètres. Les micas, dont la structure contient 4 % d'eau, jouent un rôle similaire.

En restituant leur eau au cours de l'ascension, les minéraux peuvent jouer un rôle critique. Cette eau devient de la vapeur qui, parce qu'elle occupe sous cette forme gazeuse un volume bien plus important (il est plus de 1400 fois supérieur, à la pression atmosphérique), est susceptible, avec les autres gaz volcaniques, d'entraîner une éruption.

Décompression explosive du magma

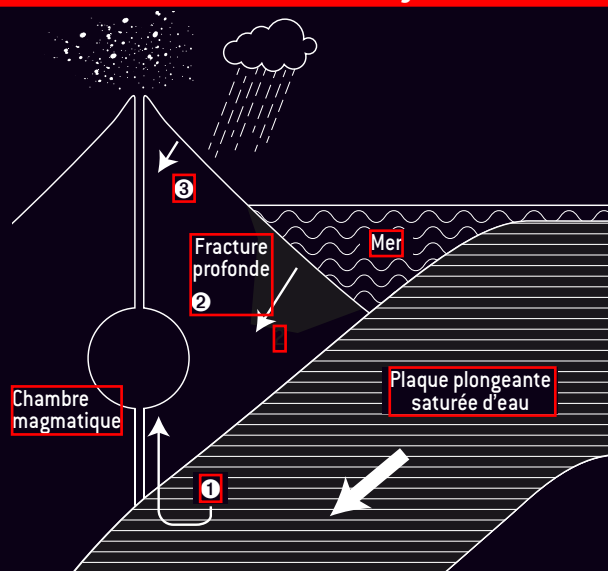
Dans son parcours vers la surface, le magma primaire subit une très importante décompression. L'origine des magmas primaires provenant du manteau dépend du contexte géodynamique, mais elle est généralement située entre 50 et 150 kilomètres de profondeur. Or à 100 kilomètres de profondeur, la pression est de trois gigapascals, soit 30 000 atmosphères. Ainsi, lorsque le magma arrive en surface, la pression qu'il

Comment le magma fait-il l'ascension du Kilimandjaro ?

La poussée d'Archimède explique l'ascension du magma : la densité du liquide magmatique est de 2,8 grammes par centimètre cube (g/cm^3), tandis que les roches du manteau ont une densité de 3,3 g/cm^3 . Toutefois, comment une « bulle » de magma liquide traverse-t-elle les quelque 30 kilomètres de croûte terrestre, dont la densité, 2,7 g/cm^3 , est inférieure ?

Plus étonnant, comment le magma liquide parvient-il à 6000 mètres d'altitude au sommet du Kilimandjaro ? D'un point de vue hydrostatique, du liquide peut parvenir en hauteur si un canal sous pression l'y conduit. Si l'on suppose qu'une « tuyauterie volcanique » conduit le magma depuis la profondeur h , à laquelle il se forme à la pression P , jusqu'au sommet du Kilimandjaro, alors P doit être égale à la pression créée par les 6 km de volcan, les 30 km de croûte et les $(h - 30)$ km de manteau, donc approximativement à $2,7 \times 30 + 3,3 \times (h - 30)$, à

une puissance de 10 près ; P est aussi égale à la pression au bas d'une colonne de magma liquide de hauteur $(h + 6)$, pression égale donc à $2,8 \times (h + 6)$, à la même puissance de 10 près. En égalisant les deux quantités, on trouve que le magma parvenu au sommet du Kilimandjaro s'est formé à une profondeur de 69,6 km (et à une pression de 21168 atmosphères) résultat qui n'indique qu'un ordre de grandeur. C'est pour effectuer ce genre de raisonnements que les volcanologues dessinent des tuyauteries volcaniques. À quoi ressemblent-elles ? Et comment



l'eau s'y introduit-elle ? Les processus physico-chimiques et les mécanismes de transport en jeu font l'objet d'hypothèses et de tests en laboratoire : l'intérieur des volcans n'est pas accessible !

DANS UN ÉDIFICE VOLCANIQUE, l'eau peut provenir du manteau (d'une plaque plongeante dans le cas des volcans de subduction, 1), d'infiltrations profondes depuis la mer (cas des volcans sous-marins, 2), voire de la surface (3).



subit a été divisée par un facteur compris entre 15 000 et 50 000.

La pression régnant dans la chambre magmatique va dépendre directement de la teneur initiale en eau du magma. En profondeur, l'eau est entièrement dissoute dans le liquide magmatique. Étant donné les conditions de température et de pression, elle se trouve dans un état dit supercritique, intermédiaire entre ceux de gaz et de liquide. Au cours de sa remontée, lorsque la pression devient inférieure à 218 atmosphères, l'eau passe à l'état gazeux.

Le magma s'échappe s'il parvient à vaincre la pression externe

Le magma s'échappe de la chambre magmatique s'il parvient à vaincre la pression dite externe exercée par les terrains sus-jacents. Pour qu'un filon de magma – ce que les géologues nomment un dyke – s'infiltre dans les roches recouvrant la chambre magmatique, il faut donc que la pression interne dépasse la pression externe. Lorsque l'un de ces dykes atteint

la surface, on assiste à une éruption. Cela exige le développement d'une importante surpression dans la chambre magmatique: le calcul montre qu'elle doit être de l'ordre du double de la pression externe.

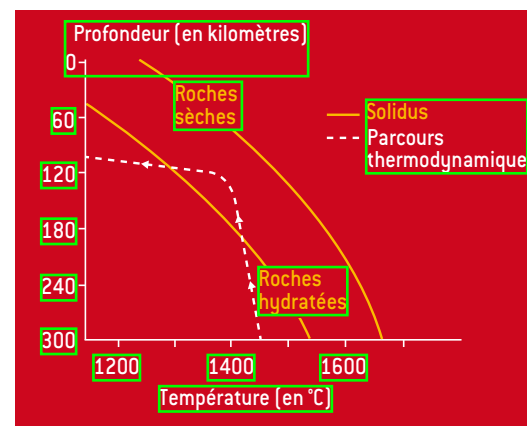
C'est pourquoi les éruptions sont rares: d'après les observations d'anciennes chambres magmatiques visibles en surface, seuls 10 à 25 % des dykes atteignent la surface. Si tous les dykes débouchaient en surface, il y aurait donc au bas mot quatre fois plus d'éruptions...

Donnons une idée de l'évolution des volumes due à la décompression. Dans le cas d'un magma contenant 3 % à 6 % d'eau, on calcule que les composés volatils, qui occupaient 1 % du volume à 3000 mètres de profondeur, en occuperont 91 % à la pression atmosphérique (voir l'encadré page 60).

Comme la pression diminue au cours de l'ascension, le magma finit par se saturer en eau. Les seuils de solubilité des composés volatils sont franchis, ce qui conduit à la formation de nombreuses bulles de vapeur, de dioxyde de carbone et d'autres gaz... Devenu ainsi biphasique (un système liquide-gaz), voire triphasique (un système solide-liquide-gaz) quand il y a

UNE ÉRUPTION RÉSULTE DE LA REMONTÉE

de roches en fusion (ci-dessus le cratère du Nyiragongo, en République démocratique du Congo). Or la fusion des roches du manteau exige des températures et des pressions adéquates. Le solidus est la ligne du diagramme (température, pression) qui délimite la phase purement solide (ci-dessous, lignes jaunes). Lors d'un parcours thermodynamique donné (ligne blanche en pointillé), il y a fusion si le parcours coupe le solidus, ce qui est ici le cas pour des roches hydratées, mais pas pour des roches sèches.

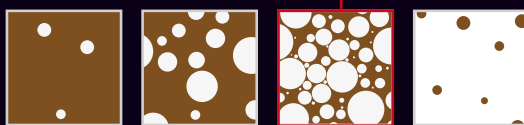
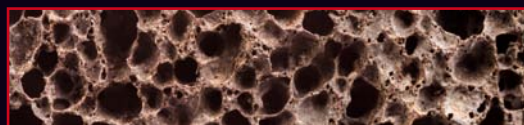


Explosion volcanique ou décompression gazeuse ?

Eau, dioxyde de carbone, dioxyde de soufre, sulfure d'hydrogène, dihydrogène... Les gaz volcaniques sont divers, mais comme le montrent bien les panaches volcaniques (ci-contre, celui de l'Hekla en Islande), la vapeur d'eau représente en général de l'ordre de 60 % des émissions.

Dans l'encadré page 58, un calcul approximatif montre que du magma produit vers 70 kilomètres de profondeur l'a été sous une pression de quelque 21168 atmosphères. À quelle pression se retrouve-t-il dans une chambre magmatique située dix kilomètres sous la base du Kilimandjaro ? Sa pression de naissance est diminuée de la pression due à la colonne de magma de 16 km dominant la chambre, donc 16 848 atmosphères. Or dans la chambre magmatique, les gaz volcaniques commencent à s'individualiser. On sait qu'à la pression atmosphérique, un gramme de vapeur d'eau, soit 1/18^e de mole, occupe un volume de 22,4/18 litre, soit environ 1244 cm³. Quel volume ce même gramme d'eau occupait-il dans la chambre magmatique ? Pour le déterminer, on peut appliquer la loi de Mariotte : à température constante (ici celle du magma), le produit *PV* de la pression par le volume du gaz reste inchangé. La valeur de *PV* dans la bouche du volcan valant 1×1244 , on en déduit que le volume d'un gramme d'eau dans la chambre magmatique est de $1 \times 1244 / 16\,848 = 0,074 \text{ cm}^3$, donc 74 mm³... Autrement dit, au cours de son ascension depuis la chambre magmatique jusqu'à l'air libre, le volume d'un gramme de vapeur d'eau est multiplié par un facteur de l'ordre de 17 000. Les volcans sont les événements de la Terre !

L'EXPANSION DES GAZ depuis la naissance de bulles (à gauche) jusqu'à la fragmentation du magma (à droite) explique l'explosivité des volcans.



© VANDER SCHUEREN/STOCK/COMPTON Science

des cristaux, le magma a désormais perdu en densité et gagné en volume.

L'ascension se poursuivant et la pression continuant à décroître, la quantité de bulles par unité de volume augmente; cette évolution entraîne la coalescence des bulles, qui grossissent et que la poussée d'Archimède emporte alors plus vite vers le haut.

Le type d'éruption sur lequel débouche ce processus dépend essentiellement de la composition initiale du magma, et notamment de sa richesse en eau. La mousse magmatique a tendance à remonter d'autant plus rapidement que le liquide lui ayant donné naissance est fluide, ce qui facilite l'ascension des bulles de gaz. C'est pourquoi un magma basaltique (les magmas basaltiques sont plus fluides) riche en eau conduit à des styles éruptifs plutôt effusifs.

Au contraire, dans un magma riche en eau mais visqueux, la viscosité élevée limite la séparation des composés volatils

de leur milieu liquide. Toutefois, une fois que les bulles de gaz représentent 70 à 80 % du volume, le liquide magmatique subit une brutale fragmentation, à l'origine de la phase explosive de l'éruption. Le magma plein de bulles de gaz en suspension s'est mué en un écoulement gazeux qui transporte des fragments de liquide.

Dans le cas d'un volcan émergé, la présence de composés volatils impose une première phase explosive.

Ce processus s'accélère dans la cheminée volcanique lorsque ce mélange en expansion s'approche de la surface. Parvenu dans l'atmosphère, l'écoulement prend la forme d'un jet turbulent transportant des particules brûlantes, c'est-à-dire des cendres, des bombes volcaniques et autres pyroclastes (voir l'encadré ci-dessus).

Dans le cas des volcans émergés, la présence de composés volatils dans les magmas impose donc que l'éruption commence toujours par une phase explosive, même si cette dernière n'est que brève. C'est une fois que cette première phase explosive est achevée, c'est-à-dire que le magma est largement dégazé, que suit éventuellement une phase effusive accompagnée d'émissions de laves. Divers scénarios, tels la présence d'un bouchon dans la cheminée, ou la cristallisation due au refroidissement d'un magma en ascension lente, peuvent entraîner une forte surpression interne, puis la pulvérisation cataclysmique du toit de l'édifice volcanique. Ce fut le cas en 1991 du Pinatubo, aux Philippines, ou en 1980 du mont Saint Helens, évoqué au début de cet article. Lors de leurs explosions, le sommet du Pinatubo a perdu 145 mètres, tandis que celui du mont Saint Helens en a perdu pas moins de 430 ! ■

Votre application **Pour la Science** maintenant disponible dans le kiosque Apple !

Abonnez-vous
sur tablette et smartphone
3 mois
55% de réduction*



Téléchargez gratuitement l'application sur App Store et Google Play, **et feuilletez gratuitement un extrait du numéro en cours !**



Disponible sur
App Store

DISPONIBLE SUR
Google play



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

Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie le mensuel *Pour la Science* à 4,49 € et son trimestriel *Dossier Pour la Science* à 5,99 € en version numérique optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif, contenus enrichis, feuilletage hors connexion, etc.

*Soit 4 numéros pour 9,99 € au lieu 20,96 € pour un achat à l'unité.

Quelle est notre place dans

Caleb Scharf

Pour savoir si la vie existe ailleurs dans l'Univers, il faut considérer les conditions de son émergence sur Terre : sont-elles très particulières, ou au contraire très communes ? La réponse est probablement entre les deux.

Nous habitons sur une petite planète en orbite autour d'une étoile ni trop jeune ni trop âgée. Le Soleil n'est qu'un parmi quelque 200 milliards d'astres qui composent ce grand tourbillon de matière qu'est la Voie lactée. Et, d'après les estimations des astronomes, notre galaxie n'est pas unique : plusieurs centaines de milliards d'autres occupent l'Univers observable, un volume qui s'étend maintenant autour de nous dans toutes les directions sur plus de $4,3 \times 10^{23}$ kilomètres.

Ces ordres de grandeur dépassent ce que nous sommes capables de nous représenter. Nous devons être bien naïfs pour penser que nous avons une quelconque importance dans cette immensité. Même dans la longue histoire de l'Univers, la présence de l'homme est modeste et rien ne permet de dire combien de temps il sera encore là. Chercher à déterminer la place que nous occupons dans le cosmos et à y établir notre importance paraît ridicule.

Et c'est exactement ce que nous essayons de faire ! Pourtant, notre apparente banalité est devenue une évidence dès lors que l'astronome polonais Nicolas

L'ESSENTIEL

■ Le principe copernicien

stipule que notre planète n'est pas le centre du monde, mais un membre ordinaire d'un système stellaire quelconque.

■ À l'inverse, le principe

anthropique souligne que la vie est exceptionnelle : elle n'est possible que pour des valeurs très précises des constantes fondamentales et des caractéristiques de la Terre et du Soleil.

■ On doit concilier ces

idées contradictoires afin de comprendre la place que nous occupons dans l'Univers, et de savoir si nous y sommes seuls.

Copernic (1473-1543) a déchu la Terre de la place qu'on lui attribuait au centre du Système solaire. Son idée a été l'une des avancées majeures de la science de ces derniers siècles et une étape essentielle pour comprendre la structure sous-jacente du cosmos et la nature de la réalité.

Un statut quelconque ou exceptionnel ?

Dans nos efforts pour déterminer notre importance, nous sommes confrontés à une contradiction : certaines découvertes et théories suggèrent que la vie pourrait fort bien n'avoir rien d'exceptionnel, alors que d'autres indiquent le contraire. Comment faire la synthèse de toutes nos connaissances, depuis les bactéries jusqu'au Big Bang, pour expliquer si oui ou non nous avons un statut particulier ? Et à partir du moment où notre place dans l'Univers serait mieux définie, quelles en seraient les implications pour la recherche d'organismes vivants ailleurs dans l'Univers ?

Depuis Copernic, notre vision du monde s'est enrichie dans de nombreux domaines.

I'Univers ?



L'AUTEUR



Caleb SCHARF est directeur du Centre d'astrobiologie de l'Université Columbia,

à New York aux Etats-Unis.

Cet article est adapté de son livre *The Copernicus complex: our cosmic significance in the Universe of planets and probabilities*, Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2014 (© Caleb Scharf, 2014).

Au XVII^e siècle, le commerçant et savant néerlandais Antoni van Leeuwenhoek a été le premier à observer des bactéries avec des microscopes de sa fabrication et à entrer dans le microcosme, un monde très différent du nôtre. Cette plongée remarquable vers les petites dimensions, jusque dans l'univers qui prospère à l'intérieur de notre organisme, a livré les premières indications que les composants de notre corps, les cellules, se trouvent à une extrémité du spectre de l'échelle biologique. Jusqu'à cette découverte stupéfiante de Leeuwenhoek, je doute que les hommes aient eu l'occasion de réfléchir en détail à la structuration du vivant.

Ainsi, lorsqu'il est question de taille, l'homme, 10 millions à 100 millions de fois plus grand que les bactéries, est plus proche du haut de l'échelle du vivant, dominée par les arbres et les baleines. S'agit-il d'une place particulière dans le monde du vivant, à la frontière entre la diversité complexe du biologiquement petit et les options limitées du biologiquement grand ?

En astronomie, la question de la place de l'homme se généralise à celle du vivant. Pourquoi la vie est-elle apparue sur Terre et dans le Système solaire ? L'émergence de la vie est-elle banale, donc probablement répandue dans l'Univers, ou nécessite-t-elle des conditions très spéciales, ce qui la rendrait rare dans le cosmos ?

Le Système solaire n'est pas si banal

Le Système solaire se distingue des autres systèmes planétaires connus (voir la figure ci-contre) à plusieurs égards. Le Soleil n'appartient pas à une famille d'étoiles parmi les plus répandues (la plupart sont moins massives, voir la figure page 66). Les orbites des planètes du Système solaire sont plus circulaires et plus espacées que dans la plupart des systèmes exoplanétaires, et nous ne comptons pas de super-Terre (une planète rocheuse plus grande que la Terre) parmi nos voisins planétaires. Des planètes de ce type sont présentes dans au moins 60 % des systèmes planétaires, mais pas dans le nôtre. Si vous étiez architecte de systèmes planétaires, vous considéreriez le Système solaire comme rare, un peu hors norme.

Par ailleurs, le Système solaire a échappé à un réarrangement à grande

échelle impliquant un changement des orbites planétaires : on observe dans de nombreux systèmes des planètes géantes qui se sont rapprochées de leur étoile et que l'on nomme jupiters chauds. Si le passé du Système solaire a été plutôt calme, cela ne garantit pas que son futur sera paisible. Les simulations indiquent que dans quelques centaines de millions d'années, notre système connaîtra peut-être une période plus chaotique.

Et inéluctablement, dans cinq milliards d'années, le Soleil se dilatera car il aura épuisé ses réserves d'hydrogène, ce qui modifiera radicalement les propriétés de son cortège

CETTE EXOPLANÈTE présente-elle les conditions nécessaires à l'émergence de la vie ? Et de telles planètes sont-elles nombreuses dans la Galaxie ? Pour répondre à ces questions, les astronomes doivent d'abord déterminer si la Terre et le Soleil forment un système banal et fréquent, ou exceptionnel avec des propriétés rares. La solution est selon Caleb Scharf une voie intermédiaire, un équilibre entre des conditions extrêmes.

WASH. POST/ST. JOSHUA CHILDS

de planètes. Tout indique qu'aujourd'hui, nous sommes à une transition entre une période de jeunesse stellaire et planétaire et le stade de décrépitude à venir. Notre existence dans cette période de calme relatif n'est, rétrospectivement, pas si surprenante. Comme avec de nombreux autres aspects de notre situation, nous vivons dans un endroit où tout est modéré, tempéré: ni trop chaud ni trop froid, chimiquement ni trop caustique ni trop inerte, dynamiquement ni trop instable ni trop immuable.

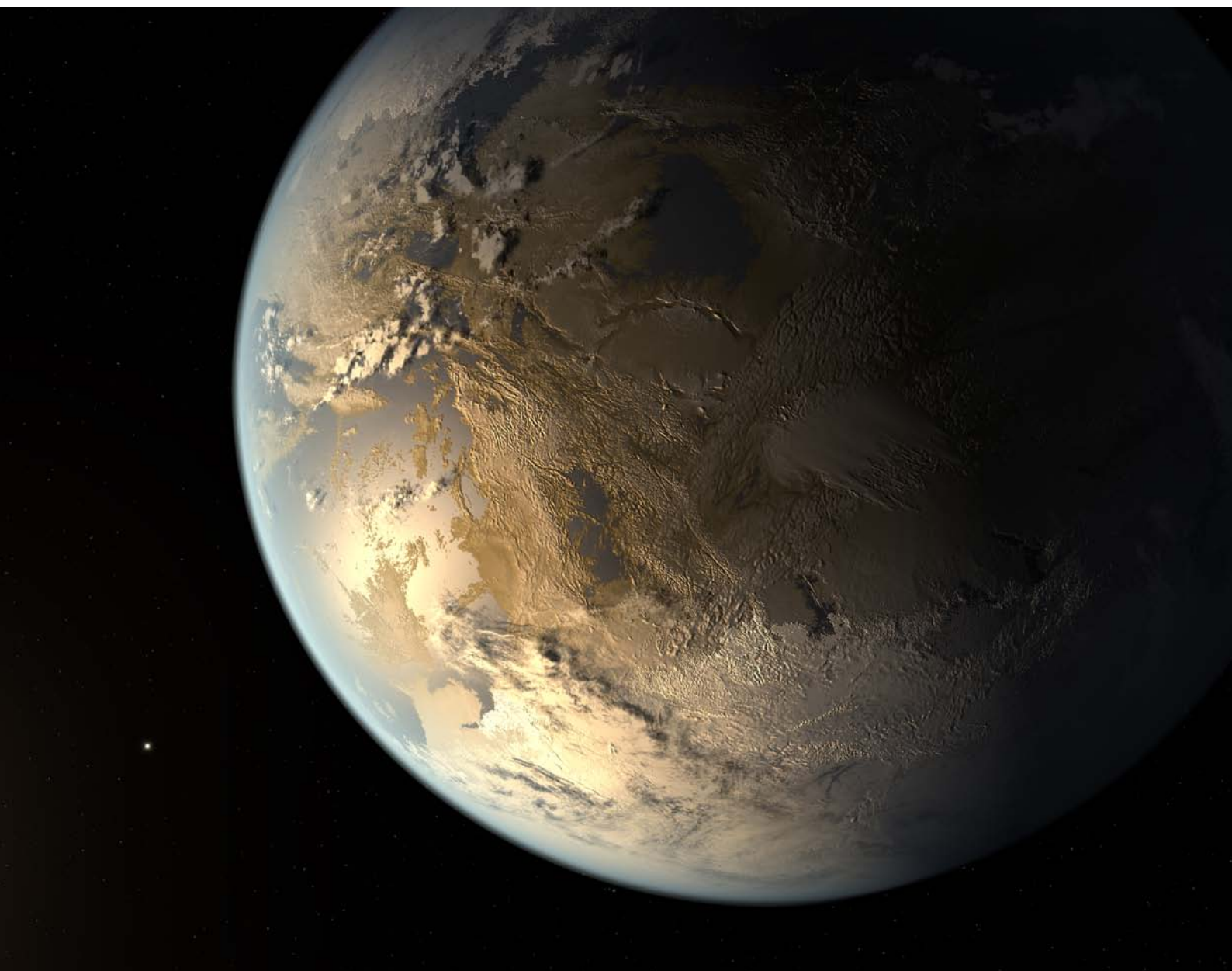
Il est également clair que cette notion de voisinage astrophysique calme s'étend bien au-delà. Dans le cadre de l'Univers

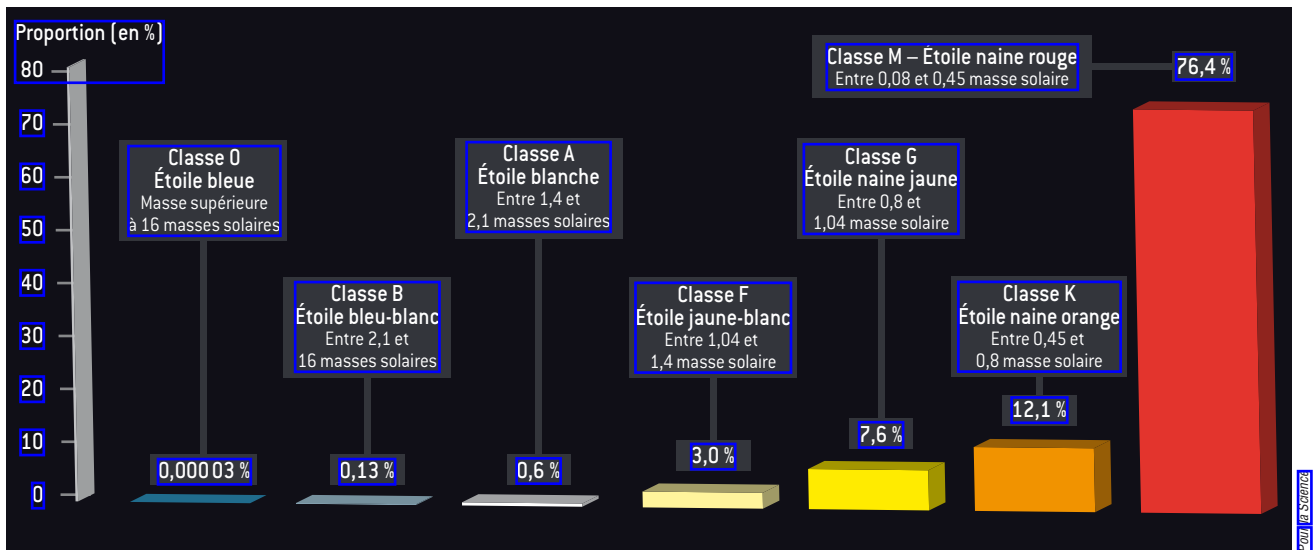
tout entier, nous nous situons après la jeunesse tumultueuse du cosmos jeune et brûlant. Partout, la production d'étoiles ralentit. Le taux de formation de nouveaux soleils avec leurs planètes ne s'élève plus qu'à trois pour cent de ce qu'il était il y a 8 à 11 milliards d'années.

Il y a cinq ou six milliards d'années, la vitesse d'expansion de l'Univers diminuait. Maintenant, nous nous trouvons dans une période de transition avec une vitesse qui repart à la hausse. L'énergie sombre, provenant du vide lui-même, accélère la croissance de l'espace, ce qui contribue à entraver le développement de grandes

structures cosmiques. Cela signifie aussi que la vie est condamnée à se retrouver, dans un futur lointain, dans une partie isolée de l'Univers.

Si l'on prend en compte toutes ces observations, il est clair que la vision que nous avons de notre microcosme et du cosmos est limitée et subjective. C'est la vue que l'on a depuis un étroit perchoir. Et de fait, notre capacité à appréhender le monde en termes d'événements aléatoires et statistiques est largement influencée par les conditions d'ordre, de désordre, d'espace et de temps dans lesquelles nous vivons. En outre, le fait que nous soyons isolés de





LES ÉTOILES SONT RÉPARTIES EN CLASSES en fonction de leurs propriétés (spectre électromagnétique, masse, etc.). Un recensement des étoiles au voisinage du Soleil montre que ce dernier, de classe G, n'appartient pas à la famille la plus répandue dans la Galaxie. Sur ce graphique, seules les étoiles les plus communes, dites de la « séquence principale », sont répertoriées.

toute forme de vie extraterrestre (au point que nous n'en ayons jamais repéré une trace jusqu'à présent) a des implications profondes sur les conclusions que nous pouvons tirer.

Des conditions uniques

Une bonne partie de nos observations concourent à la vision copernicienne selon laquelle nous n'avons rien d'exceptionnel. Toutefois, certains détails de notre environnement suggèrent le contraire. Cela a conduit à la formulation du principe anthropique, l'idée que certaines des constantes fondamentales de la nature semblent « ajustées » de telle façon que les propriétés de l'Univers favorisent l'apparition et l'épanouissement de la vie sur Terre. En effet, si ces paramètres étaient légèrement différents, la nature du cosmos serait bouleversée. Si l'intensité de la gravitation était un tant soit peu modifiée, il ne se formerait ni étoiles ni éléments lourds, ou alors des étoiles énormes naîtraient et disparaîtraient rapidement, ne laissant rien d'intéressant dans leur sillage, ni descendance ni point de départ pour la vie. De la même façon, si la force électromagnétique était différente, les liaisons entre atomes seraient trop faibles ou trop fortes pour que se construisent les structures moléculaires si diverses dont est rempli notre monde.

Que conclure de toutes ces contradictions ? J'aurais tendance à dire que les faits nous poussent vers une nouvelle vision scientifique de notre place au sein du cosmos, qui se démarque à la fois des principes copernicien et anthropique ; et je pense que cette vision est en passe de devenir elle-même un principe que nous pourrions nommer principe cosmo-chaotique, à mi-chemin entre l'ordre (rappelons que *kósmos* signifie « ordre » en grec) et le chaos.

L'idée essentielle est que la vie, et en particulier la vie telle que nous la connaissons sur Terre, se situera toujours à la frontière ou à l'équilibre entre des états définis par des caractéristiques telles que l'énergie, les dimensions, l'espace, le temps, l'ordre et le désordre. Des facteurs tels que la stabilité ou le chaos des orbites planétaires, les variations du climat et la géophysique d'une planète, sont des manifestations directes de ces caractéristiques. Dès que l'on s'éloigne un peu trop, dans un sens ou dans l'autre, de ces conditions d'équilibre, la possibilité d'émergence de la vie disparaît et l'on est plongé dans un milieu hostile. Pour que des organismes vivants se développent, il faut le bon mélange d'ingrédients, de calme et de chaos – le yin et le yang adéquats.

Cette approche rejoint en substance ce que les anglophones nomment le « Goldilocks principe », le « principe Boucles d'or » qui s'inspire du conte pour enfants et qui

Le
principe
d'équilibre entre
l'ordre et le chaos
suggère que la vie n'est
ni rare ni fréquente
dans l'Univers.

stipule que les conditions du « juste milieu » sont préférables. En astrobiologie, cela se traduit par un environnement cosmique tempéré pour une planète tournant autour d'une étoile. Mais de telles conditions ne correspondent qu'à une plage étroite de paramètres. En outre, la zone hospitalière ne serait pas statique. Elle évoluerait dans le temps et l'espace au gré de la combinaison et des variations de plusieurs paramètres.

Une carte des zones fertiles

Si l'équilibre des conditions est une règle universelle pour l'apparition de la vie, cela soulève de curieuses possibilités en ce qui concerne notre importance cosmique. Contrairement aux idées coperniciennes strictes, qui soulignent notre banalité et suggèrent donc une abondance de situations similaires dans le cosmos, le fait que la vie nécessite une combinaison subtile et dynamique de paramètres réduit les possibilités. Les chances de voir apparaître la

vie dans le cadre de cette nouvelle vision se différencient aussi des idées anthropiques qui, dans leur version la plus extrême, ne prédisent qu'une seule occurrence de la vie dans tout l'espace et le temps.

Cette nouvelle règle identifie les endroits où la vie devrait se développer et la fréquence à laquelle cela devrait se produire. Elle spécifie les caractéristiques fondamentales nécessaires pour la vie en fonction des nombreux paramètres variables : elle dessine la carte des zones fertiles.

Une telle règle ne confère pas aux organismes vivants un statut à part. Certes, la biologie est sans doute le phénomène physique le plus complexe de cet univers-ci, mais cela ne va peut-être pas plus loin qu'une structure naturelle particulièrement complexe qui apparaît dans les bonnes circonstances, quelque part entre l'ordre et le chaos. Et cette conceptualisation de la place de la vie dans la nature résout le paradoxe apparent entre les arguments convaincants selon lesquels la vie doit être abondante et ceux qui la supposent extrêmement rare. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Scharf, **Les bienfaits des trous noirs**, *Pour la Science*, n° 420, octobre 2012.

L. Krauss et G. Starkman, **Le destin ultime de la vie**, *Pour la Science*, n° 269, mars 2000.



Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

cnrs formation entreprises

16 axes de formation

Statistiques, informatique et big data
Modélisation et SIG
Génie logiciel
Électronique, optique, métrologie
Matériaux et molécules : mise en oeuvre
Matériaux et molécules : caractérisation
Microscopies
Chromatographies
Spectroscopie en analyse
Spectrométrie de masse
Résonance magnétique nucléaire
Biologie
Bioinformatique
Expérimentation animale
Qualité, environnement
Sécurité, radioprotection

Des formations aux technologies de pointe pour les ingénieurs et les techniciens

Des stages de courte durée (3 à 5 jours), se déroulant dans les laboratoires du cnrs, en effectifs réduits (env. 10 stagiaires)

Une pédagogie basée sur l'expérimentation

La possibilité de stages organisés en intra-entreprise

cnrsformation.cnrs.fr

cfe.contact@cnrs.fr 01.69.82.44.55

L'animal une colonie d'organismes ?

Stéphane Schmitt

Au XIX^e siècle, des naturalistes proposèrent qu'à l'image des coraux ou des salpes, la plupart des animaux soient constitués d'organismes plus petits. Cette théorie coloniale s'est perpétuée jusqu'à aujourd'hui.

Coraux, éponges, ascidies... De nombreux organismes animaux, appartenant à des groupes aquatiques divers, présentent une organisation singulière : ils vivent en colonies. Le principe est toujours le même : un individu initial se multiplie de manière asexuée et les individus résultants restent associés les uns aux autres, constituant une sorte de super-organisme, parfois de taille considérable.

Chez certaines espèces, tous les individus sont identiques et bien discernables. C'est le cas des polypes du corail, par exemple. Chez d'autres, tels les siphonophores du zooplancton (voir les figures pages 69, 71 et 72), il se produit une spécialisation des individus : certains assurent la reproduction sexuée, d'autres la nutrition, etc. Ce processus va parfois si loin que la colonie prend l'aspect d'un organisme unique, dont les différents individus, très difficiles à discerner, représentent en quelque sorte des « organes ».

Les naturalistes ont mis en évidence cette particularité dans les premières décennies du

L'ESSENTIEL

■ Certains organismes marins vivent en colonies, où ils n'ont parfois pas tous la même fonction.

■ Au début du XIX^e siècle, partant de ce constat, des naturalistes ont imaginé que tout animal était une colonie d'animaux élémentaires.

■ Loin d'anéantir cette idée, la théorie de l'évolution de Darwin l'a renforcée.

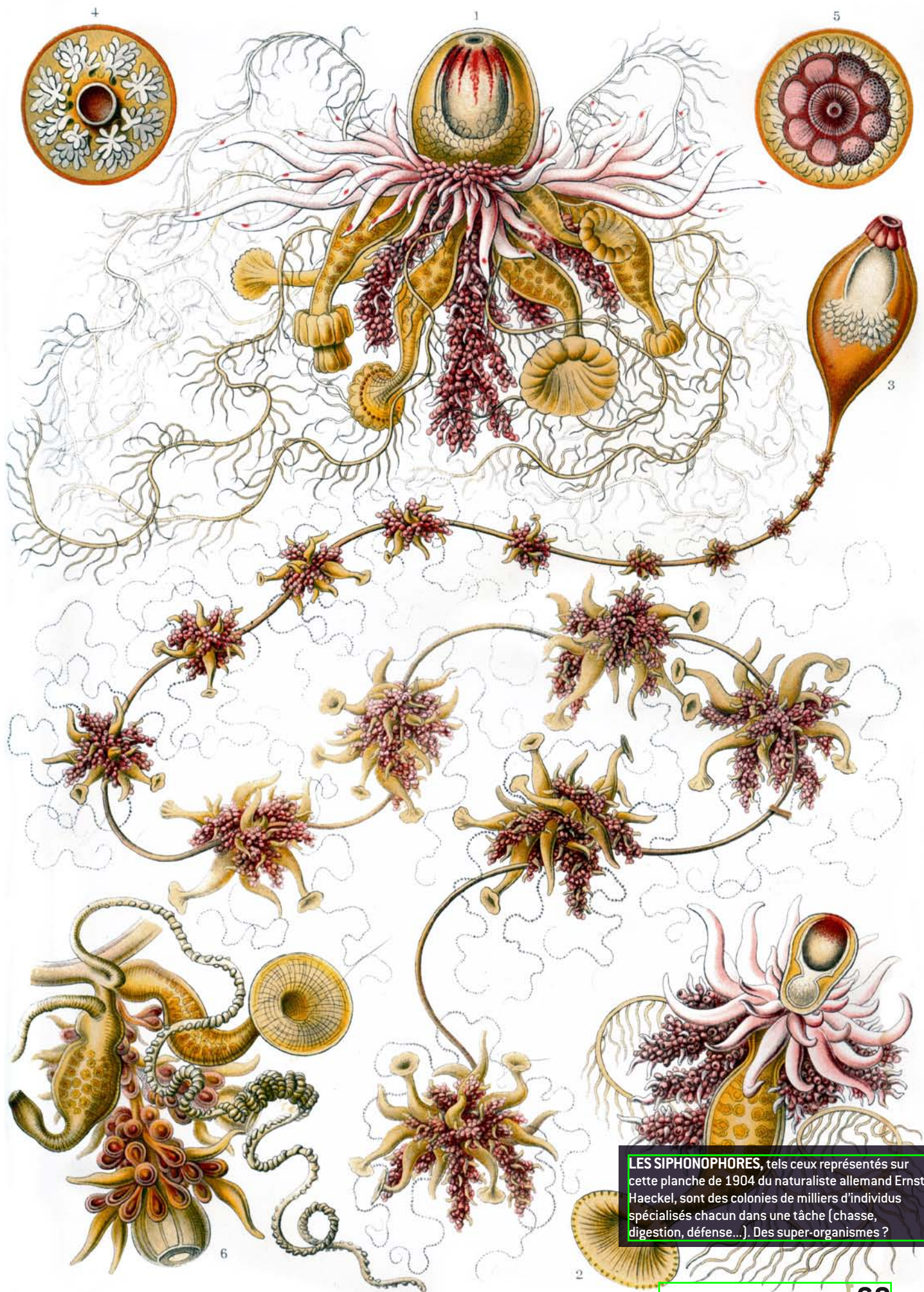
■ Encore aujourd'hui, la théorie coloniale nourrit les réflexions de biologistes.

XIX^e siècle chez plusieurs espèces animales qu'on jugeait alors « inférieures », telles les salpes ou les ascidies (des animaux marins). Mais très vite, certains se sont demandé si ce type d'organisation n'était pas universel et si les organismes « supérieurs » n'étaient pas eux aussi des colonies d'organismes élémentaires plus petits, spécialisés au point d'être méconnaissables.

Des animaux composés d'animaux

Cette théorie coloniale n'est qu'une des nombreuses propositions qui ont fleuri à l'époque pour expliquer l'origine des formes animales. Toutefois, contrairement à d'autres, elle a survécu aux bouleversements successifs des sciences du vivant, tel l'avènement de la théorie de l'évolution. Elle s'en est même trouvée renforcée et s'est perpétuée jusqu'à nos jours.

L'année 1830 est célèbre dans l'histoire des sciences de la vie en raison de la vive



LES SIPHONOPHORES, tels ceux représentés sur cette planche de 1904 du naturaliste allemand Ernst Haeckel, sont des colonies de milliers d'individus spécialisés chacun dans une tâche (chasse, digestion, défense...). Des super-organismes ?

controverse qui opposa alors deux des plus éminents savants français de l'époque, Georges Cuvier et Étienne Geoffroy Saint-Hilaire. Les historiens, notamment l'Américaine Toby Appel dans les années 1980, ont montré que de profondes fractures politiques et sociales sous-tendaient cette querelle, dont la médiatisation avait été bien au-delà de la communauté scientifique. Mais si l'on s'en tient au domaine scientifique, l'enjeu fondamental de ce débat était le sens à donner à la diversité des plans d'organisation – la disposition relative des différents éléments constitutifs de l'organisme – dans le règne animal.

Pour Geoffroy, en dépit de leurs différences, tous les groupes d'animaux se rattachaient à un même type général, commun, valable aussi bien pour les insectes et les mollusques que pour les vertébrés. Cuvier, au contraire, considérait qu'il existait des plans d'organisation bien distincts, irréductibles les uns aux autres, et que l'anatomie d'un vertébré, par exemple, était radicalement différente de celle d'un arthropode. La querelle s'éteignit sans véritable vainqueur en raison de la Révolution de 1830, puis de la mort de Cuvier deux ans plus tard ; mais la question qu'elle avait soulevée demeura au devant de la scène et suscita toutes sortes de réflexions sur la morphologie des êtres vivants.

Par ailleurs, vers la même époque, on mit en évidence l'organisation coloniale de divers organismes, tels les siphonophores, étudiés par le voyageur et naturaliste français Charles-Alexandre Lesueur, ou les salpes, par le romancier allemand Adelbert von Chamisso. Les découvertes se multiplièrent dans les années 1820 et 1830, nourrissant la réflexion sur la notion d'individualité dans le monde animal.

C'est dans ce contexte qu'un médecin et naturaliste montpelliérain, Alfred Moquin-Tandon, publie en 1827 une *Monographie de la famille des Hirudinées* où, frappé par le caractère répété de l'organisation de la sangsue, non seulement dans sa morphologie externe segmentée, mais aussi dans son anatomie interne, il propose d'y voir non pas un être simple mais « un animal composé d'un certain nombre d'animaux »

L'AUTEUR



Stéphane SCHMITT est directeur de recherche au laboratoire SPHERE (UMR 7219, CNRS), à

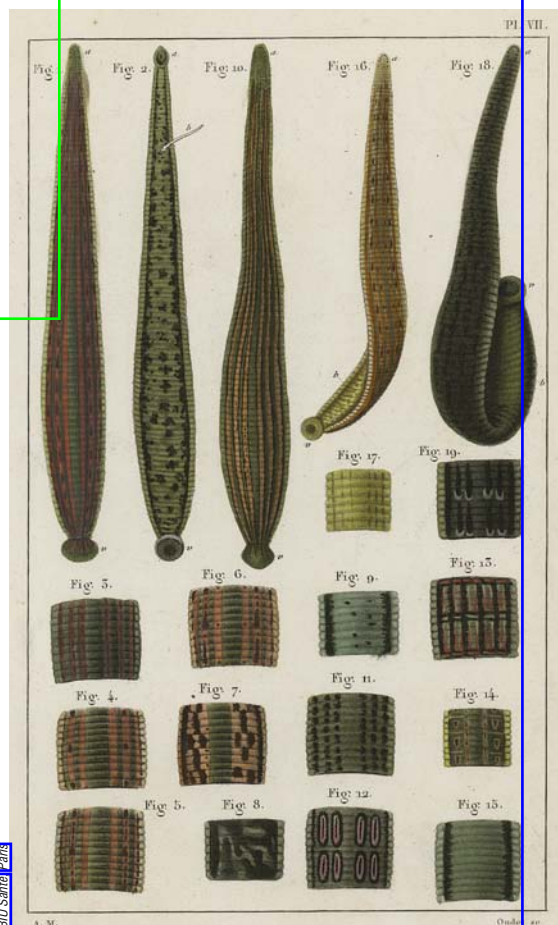
l'Université Paris-Diderot.

(voir la figure ci-dessous). Pour désigner ces animaux élémentaires correspondant aux segments de la sangsue, il introduit un nouveau concept, celui de « zoonite ». Selon lui, il existe donc dans les animaux segmentés « deux espèces de vie », les « vies particulières » des différents zoonites et la « vie générale » de l'ensemble.

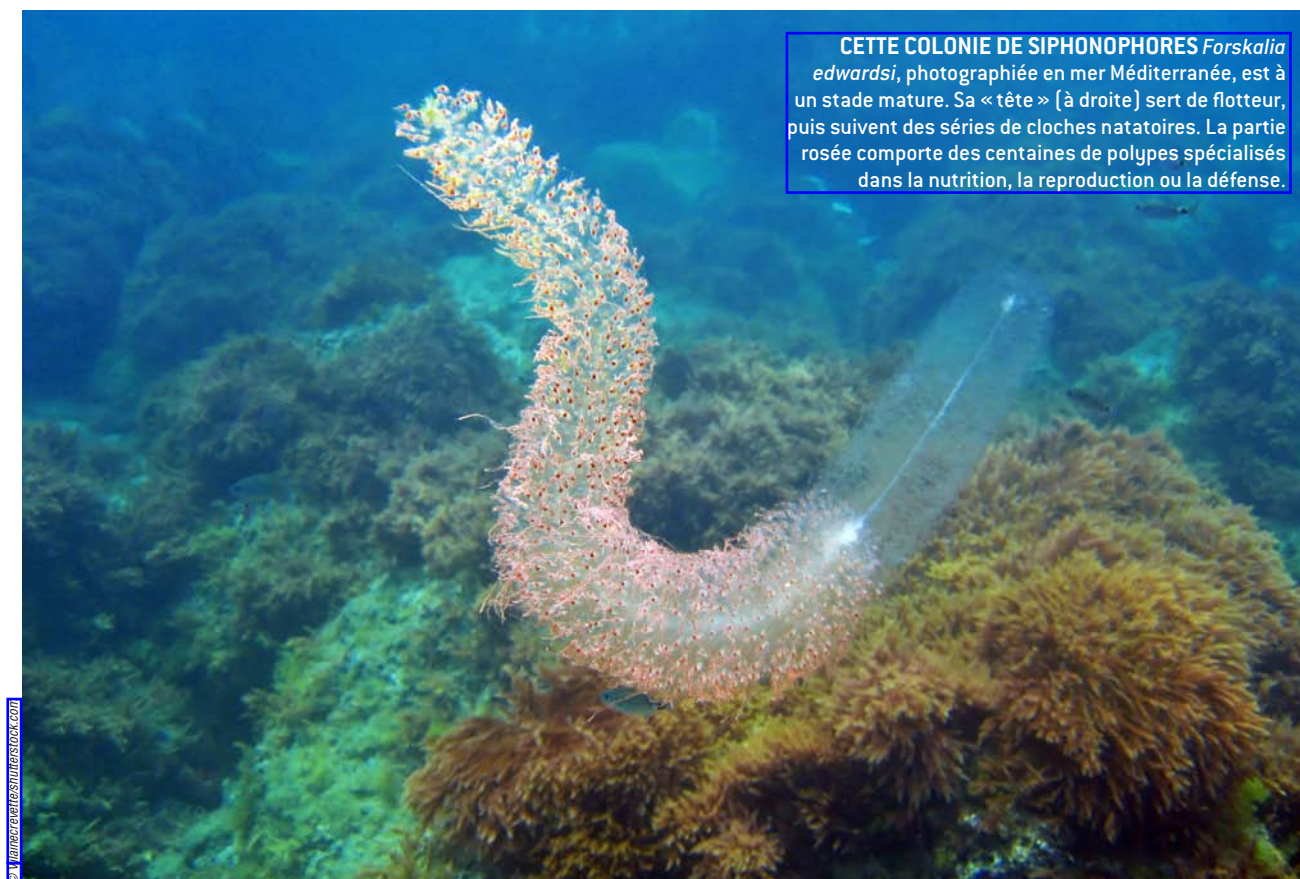
Ces notions vont faire l'objet d'une réflexion plus poussée de la part d'un ami de Moquin-Tandon, Antoine-Louis Dugès, également médecin à Montpellier. Dugès emprunte à son collègue la notion de zoonite, mais en fait la clef de voûte d'une théorie plus générale sur l'organisation des animaux, publiée en 1832 dans son *Mémoire sur la conformité organique dans l'échelle animale*.

Selon lui, tout animal est composé d'organismes plus petits, les zoonites, pourvus chacun des principaux organes vitaux. Les espèces les plus simples, telles les ascidies non coloniales, ne comportent qu'un zoonite. Les animaux plus complexes, tels les arthropodes ou les vertébrés, en comprennent un nombre plus ou moins grand, accolés les uns aux autres et éventuellement spécialisés dans la réalisation de certaines fonctions. Chez les arthropodes, les annélides et d'autres espèces, on reconnaît assez bien cette organisation plurielle ; en revanche, dans les groupes les plus élaborés (notamment les vertébrés), elle est à peine décelable et l'association est si parfaite que seuls quelques indices, telle la répétition des côtes et des vertèbres, révèlent l'existence primordiale des zoonites.

Dans l'esprit de Dugès, cette théorie de la conformité organique réconcilie les vues de Geoffroy Saint-Hilaire et de Cuvier. Au premier, il emprunte l'idée qu'il y a bien une constante dans l'organisation de tous les animaux. Du second, il retient l'impossibilité de comparer les anatomies entières d'un mollusque, d'un insecte et d'un vertébré, par exemple : l'unité morphologique des animaux se manifeste uniquement à l'échelle des zoonites dont ils sont constitués. Dans certains groupes tels les vertébrés, ces zoonites sont disposés en file ; dans d'autres, ils sont en cercle (anémones de mer) ou en



CHACUN DES SEGMENTS D'UNE SANGSUE serait un petit animal, propose en 1827 le médecin Alfred Moquin-Tandon dans sa *Monographie de la famille des Hirudinées* (ici, une planche de l'édition de 1846).



CETTE COLONIE DE SIPHONOPHORES *Forskalia edwardsi*, photographiée en mer Méditerranée, est à un stade mature. Sa « tête » (à droite) sert de flotteur, puis suivent des séries de cloches natatoires. La partie rosée comporte des centaines de polypes spécialisés dans la nutrition, la reproduction ou la défense.

formation irrégulière, etc. Ces différents types se combinent parfois et il arrive qu'un même animal passe par différents types au cours de son développement.

L'évolution renforce la théorie coloniale

À cette époque, diverses théories transformistes émergent en Europe : alors que l'on admettait auparavant que les espèces étaient immuables depuis l'origine du monde, plusieurs savants en Angleterre, en Italie et en France ont, dès la fin du XVIII^e siècle, formulé l'hypothèse d'une transformation graduelle des formes de vie. En 1809, notamment, le naturaliste Jean-Baptiste Lamarck a construit, dans sa *Philosophie zoologique*, une théorie où il explique comment la vie se complexifie et se diversifie au fil de telles transformations.

Toutefois, les réflexions de Dugès ne sont pas liées à ces théories transformistes. Pour lui, le processus de coalescence des zoonites n'est pas survenu au cours d'une éventuelle évolution. Il s'agit d'une organisation idéale des animaux, et non du résultat d'une histoire. Pour autant, quelques décennies plus tard,

cette conception coloniale de la morphologie animale sera reformulée sans difficulté dans le cadre du transformisme triomphant.

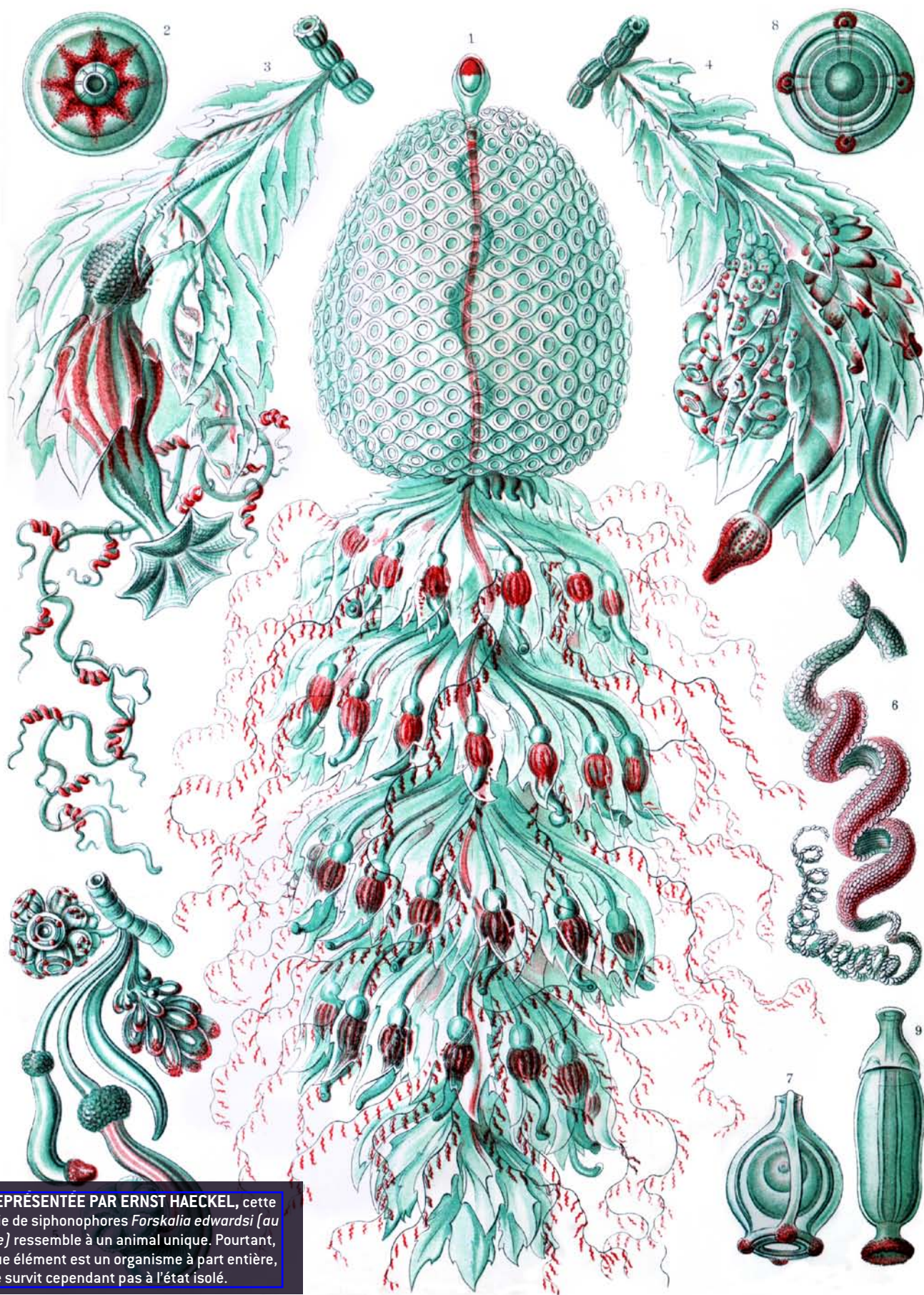
En effet, après la parution de l'*Origine des espèces* de Darwin, en 1859, la théorie de l'évolution connaît un progrès rapide dans les milieux scientifiques. En une quinzaine d'année, même si toutes les conceptions darwiniennes (notamment la sélection naturelle) ne font pas l'unanimité, la majorité des biologistes admet que les espèces évoluent.

Dans ce contexte, de nombreux concepts nés dans un cadre qui n'avait rien de transformiste, tels que l'idée d'unité de plan des animaux (la théorie de Geoffroy Saint-Hilaire selon laquelle tous les animaux sont bâtis sur un même modèle) ou les homologies (telle partie d'un insecte correspond à telle partie d'un vertébré), sont réinterprétés. Par exemple, la notion d'un type idéal commun à tous les animaux acquiert une réalité physique : ce type n'est plus seulement une vue de l'esprit, mais l'ancêtre commun à tous ces animaux, dont ils ont hérité une organisation générale unique.

De même, l'évolution offre à la théorie de Dugès un sens nouveau, puisqu'il est désormais possible de considérer qu'il a réellement existé, au cours de l'histoire de la vie, un processus d'agrégation en colonie d'organismes élémentaires. Ainsi, à la fin du XIX^e siècle, plusieurs auteurs proposent des théories coloniales. L'un des plus emblématiques est le zoologiste français Edmond Perrier, professeur au Muséum national d'histoire naturelle, qui tente de reconstruire toute la phylogénie

« Tout animal est composé d'organismes plus petits, les zoonites, pourvus chacun des organes vitaux. »

animale selon ce principe. Dans un ouvrage au titre explicite, *Les Colonies animales et la formation des organismes* (1881), il explique que les animaux sont composés d'unités microscopiques, les « plastides » (qui correspondent *grosso modo* aux cellules), elles-mêmes organisées en unités d'ordre supérieur, les « mérides » (correspondant à peu

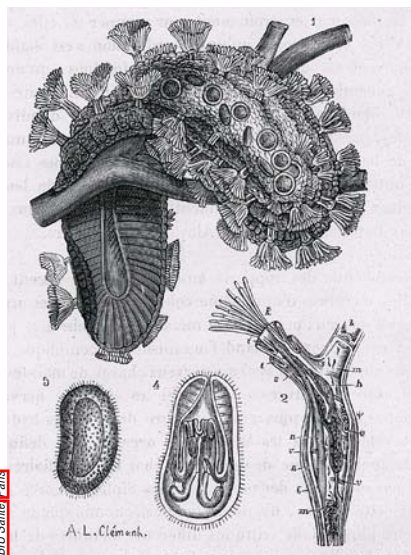


ICI REPRÉSENTÉE PAR ERNST HAECKEL, cette colonie de siphonophores *Forskalia edwardsi* [au centre] ressemble à un animal unique. Pourtant, chaque élément est un organisme à part entière, qui ne survit cependant pas à l'état isolé.

près aux zoomites de Dugès). Les mérides sont donc des « sociétés de plastides » où chaque plastide peut se différencier et se spécialiser dans la réalisation d'une tâche particulière.

Les animaux les plus simples sont formés d'un seul méride. Mais un méride ne peut excéder une certaine taille : par conséquent, dès que les dimensions et la complexité des animaux augmentent, lors du développement embryonnaire ou de l'évolution, il se produit une division des mérides par bourgeonnement. Or soit cette division va jusqu'à son terme, produisant alors des mérides indépendants, soit les mérides restent associés entre eux, produisant alors des colonies que Perrier nomme des zoïdes.

Dans ces zoïdes, les mérides restent peu différenciés, comme chez les vers de terre, aux segments semblables et bien reconnaissables, ou, au contraire, ils présentent une forte différenciation et une division du travail. Par ailleurs, les mérides s'ordonnent différemment selon l'espèce : en arborescence, en rayons, en ligne... La plupart des animaux



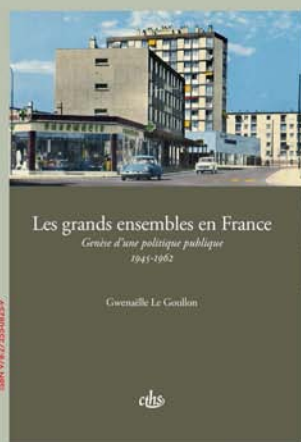
POUR EDMOND PERRIER, les bryozoaires (ici sur une planche de l'édition de 1898 de son livre *Les colonies animales*) sont des colonies de colonies de colonies de micro-organismes, les plastides. Ensemble, ces animaux aquatiques ont l'aspect de mousses alvéolaires, et plusieurs espèces contribuent à la formation des récifs coralliens.

supérieurs, notamment les vertébrés, représentent de telles colonies linéaires, où les mérides sont si bien agrégés et différenciés que l'origine coloniale du corps n'apparaît plus que dans la répétition de quelques structures (vertèbres, côtes, nerfs crâniens et rachidiens...). Enfin, dans certains groupes (les bryozoaires, par exemple, voir la figure ci-contre), le même processus de division et de spécialisation conduit à la formation de colonies de zoïdes, que Perrier nomme « dèmes ».

La théorie coloniale de Perrier ressemble donc à celle de Dugès, ce que Perrier lui-même met en avant dans un ouvrage d'histoire des sciences (*La Philosophie zoologique avant Darwin*, 1884). Les deux principales différences sont, d'une part, l'existence chez Perrier d'une hiérarchie plus complexe de niveaux d'organisations (des plastides aux dèmes) et, d'autre part, l'introduction de la dimension phylogénétique. Ainsi, la référence à l'évolution, désormais centrale dans la biologie postdarwinienne, n'a aucunement éliminé les conceptions antérieures,

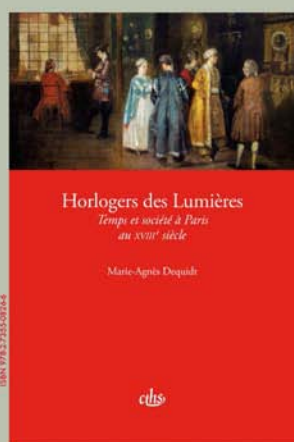
Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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 €

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques • ventes@cths.fr • vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr • Distribution Sodis

Du ver de terre à la division du travail

L'essor de la théorie coloniale à partir des années 1830 est intimement lié à l'émergence des sciences sociales vers la même époque. Plusieurs naturalistes établissent un parallèle entre les sociétés et les organismes vivants, conçus comme des associations d'éléments plus simples.

Ce thème apparaît par exemple chez le zoologiste français Henri Milne-Edwards, qui fonde pour une large part sa conception de l'organisme animal sur la « loi de division du travail ». Il compare l'organisme à une usine et les organes à des ouvriers, chacun ayant un rôle précis et se voyant attribuer une tâche particulière qu'il exerce avec d'autant plus d'aptitude qu'il n'a pas à se soucier des autres travaux. « Le principe suivi par la nature dans le perfectionnement des êtres, dit-il, est le même que celui si bien développé par les économistes modernes et, dans ses œuvres aussi bien que dans les produits de l'art, on voit les

avantages immenses de la division du travail. » L'influence des grandes théories économiques de cette époque de révolution industrielle, notamment celles d'Adam Smith, est manifeste.

Ce lien étroit se renforce encore après 1859, enrichi de la dimension historique grâce à la diffusion du transformisme. L'analogie entre les sociétés humaines et les colonies animales est par exemple une constante du discours d'Edmond Perrier, qui introduit toute une terminologie métaphorique autour de ce thème. Il décrit ainsi les zoonites spécialisés d'une colonie comme des « fonctionnaires », qui certes dépendent du reste

de la colonie pour leur subsistance, mais « dont l'utilité pour la colonie peut être de premier ordre, car ils deviennent les instruments de sa puissance et lui assurent, en définitive, la victoire dans la lutte pour la vie ».

De même, lorsqu'il écrit que des colonies de plastides ou de mérides ne peuvent dépasser une certaine taille et que celles qui peuvent bourgeonner « ont l'avantage sur les autres, car elles répartissent sur un grand nombre d'individus les mauvaises chances au lieu de les accumuler sur un seul », l'analogie est frappante avec le discours contemporain sur l'expansion coloniale des nations européennes. À l'époque, ce discours apparaît à certains comme une sorte d'exutoire nécessaire à l'excédent de population, une alternative à la limitation des naissances proposée par Malthus.

Inversement, de nombreux sociologues ont recours à la métaphore biologique, tel Herbert Spencer, qui compare la coalescence des segments des crustacés à la fusion des royaumes anglo-saxons au Haut Moyen-Âge. En 1893, dans *De la division du travail social*, le Français Émile Durkheim établit un parallèle entre le degré de complexité des sociétés humaines et celui des organismes : de même que la segmentation des animaux inférieurs (les vers), où chaque segment est capable d'assurer toutes les fonctions, évolue vers une différenciation croissante des segments chez les animaux supérieurs, les sociétés passent, au cours de l'histoire, d'un stade primitif dans lequel chaque individu est à peu près polyvalent, à un état plus évolué caractérisé par la division du travail et la « solidarité organique ».

BIBLIOGRAPHIE

S. Schmitt, *Histoire d'une question anatomique : la répétition des parties*, MNHN, 2004.

I. B. Cohen (éd.), *The Natural Sciences and the Social Sciences : Some Critical and Historical Perspectives*, Kluwer, 1994.

I. A. Appel, *The Cuvier-Geoffroy Debate. French Biology in the Decades before Darwin*, Oxford University Press, 1987.

mais leur a donné une nouvelle jeunesse en leur procurant un cadre explicatif concret.

Le cas de la théorie coloniale révèle une autre grande tendance des sciences de la vie de la fin du XIX^e siècle : si l'idée d'évolution est bien admise, le scénario darwinien de la sélection naturelle, qui suppose un caractère aléatoire et non orienté de l'évolution, a, lui, plus de mal à s'imposer. Dans l'histoire phylogénétique imaginée par Perrier, l'évolution correspond nécessairement à un processus de complexification croissant, à une acquisition progressive de niveaux d'organisation de plus en plus élaborés, semblable à ce qui se produit dans l'évolution des sociétés humaines (voir l'encadré ci-dessus).

Cette conception plutôt lamarckienne de l'évolution est dominante non seulement chez les biologistes français qui, à l'exemple de Perrier, se réclament de Lamarck, mais aussi chez des auteurs qui se prétendent darwiniens, tel l'Allemand Ernst Haeckel dont les conceptions présentent de nombreux points communs avec celles de Perrier.

Après 1900, comme la plupart des théories qui ont tenté à l'époque d'expliquer l'origine des formes animales, la théorie coloniale a connu un lent déclin à mesure que de nouvelles approches et disciplines (notamment la génétique, puis la biologie moléculaire) se sont répandues et ont relégué au second plan la morphologie traditionnelle.

Mais elle n'est pas morte pour autant. Elle s'est perpétuée et a continué à avoir des partisans tout au long du XX^e siècle. Mieux encore, avec le regain d'intérêt pour la phylogénie survenu après 1980, notamment grâce à l'essor de la biologie développementale de l'évolution, elle se trouve de nouveau invoquée. Par exemple, Thurston Lacalli, de l'Université du Saskatchewan au Canada, propose dans une série d'articles parus depuis 1997 une théorie coloniale de l'origine des vertébrés, suggérant que la structure segmentée de leurs embryons serait homologue à certaines colonies linéaires de tuniciers tels que les salpes. Inépuisable, l'idée de Dugès s'adapte encore et toujours au contexte scientifique... jusqu'à quand ? ■



LA MARCHÉ DES SCIENCES

DÉCOUVERTES, INVENTIONS, AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE



AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
14H - 15H

Écoute réécoute, podcast
franceculture.fr



La sélection de livres

POUR LA SCIENCE

Avez-vous déjà rencontré « Chury » ? Regardé le monde à travers le prisme de la physique ? Grâce à cette sélection de livres, continuez à explorer la science avec gourmandise.



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

Stéphane Sarrade

Réf. 74650884

Surveillance de notre santé, traque des polluants de notre environnement, détection des fraudes alimentaires, résolution d'affaires criminelles... : jusqu'où donc ira la chimie analytique ? Pour autant, peut-on tout mesurer ?

Éditions Le Pommier 2015
128 pages – 7,90 € - 978-2-7465-0884-2



Le robot, meilleur ami de l'homme ?

Rodolphe Gelin

Réf. 74650883

Quel chemin reste-t-il à parcourir aux chercheurs en robotique pour que les robots humanoïdes, censés nous aider dans notre vie quotidienne, deviennent de véritables compagnons ?

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



Nouveauté

La mission Rosetta le défi de l'ESA

À l'issue des années 2010, aucun vol d'exploration n'a jamais été tenté. Ce sera chose faite avec le projet européen Rosetta. Pour la première fois, une sonde en orbite autour d'une comète distante de cinq cents millions de kilomètres de la Terre. L'accompagnement dans sa course vers l'astéroïde du Système solaire externe est confié à la sonde Rosetta. Retrouvez les grandes étapes de cette mission, une des plus ambitieuses de l'histoire de l'exploration spatiale.

Une histoire mouvementée

L'histoire de la mission Rosetta commence au début des années 1980, lorsque l'ESA a lancé son premier programme scientifique d'exploration spatiale à long terme. L'objectif était de lancer une sonde vers une comète à une distance de 100 millions de kilomètres de la Terre. L'ESA a choisi les quatre « grandes comètes » qui étaient les plus proches de la Terre à l'époque. L'ESA a choisi la comète de Halley (1986) pour la première mission, la comète de Tempel (1994) pour la deuxième, la comète de Wirtanen (1998) pour la troisième, et la comète de Schwassmann-Wachmann (1996) pour la quatrième. La mission Rosetta a été choisie pour la cinquième mission, la comète de 67P/Churyumov-Gerasimenko.

La mission Rosetta a été choisie pour la cinquième mission, la comète de 67P/Churyumov-Gerasimenko. La mission Rosetta a été choisie pour la cinquième mission, la comète de 67P/Churyumov-Gerasimenko. La mission Rosetta a été choisie pour la cinquième mission, la comète de 67P/Churyumov-Gerasimenko.



À la rencontre des comètes De Halley à Rosetta

Thérèse Encrenaz et James Lequeux

Réf. 70119206

Que nous apprennent les comètes sur les premiers âges du Système solaire ? Comment les scientifiques ont-ils finalement découvert le secret de leur trajectoire ? Et que savons-nous de leur origine ? Un livre à la pointe de l'actualité, écrit par deux vulgarisateurs hors pairs.

Éditions Belin 2015
160 pages – 22,90 € - 978-2-7011-9206-2

En partenariat avec les éditeurs

Belin:
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777

Éditions
Le Pommier

Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie

ou en renvoyant le bon de commande ci-contre.



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



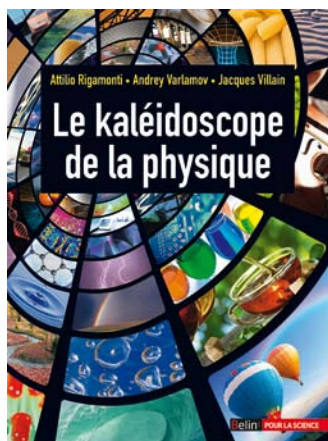
Drôle de chimie ! (nouvelle édition)

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



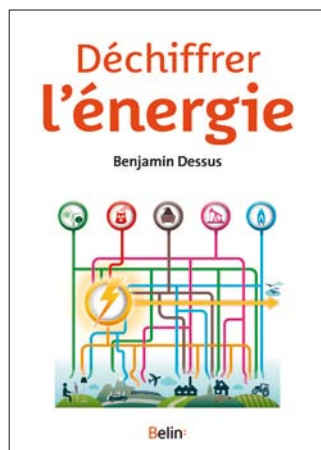
Le kaléidoscope de la physique

Andrey Varlamov,
Attilio Rigamonti et
Jacques Villain

Réf. 70116487

Pourquoi les cours d'eau dessinent-ils des méandres ? Comment faire chanter un verre à pied ? Que se passe-t-il lors de la cuisson d'un rôti ? Est-il possible de déguster un plat de pâtes al dente en haut de l'Everest ? Et d'y boire un bon café ? Toutes ces questions, et bien d'autres, trouvent leur réponse dans ce livre.

Editions Belin 2014
256 pages - 27 € - 978-2-7011-6487-8



Déchiffrer l'énergie

Benjamin Dessus

Réf. 70116440

Par l'un des meilleurs spécialistes du sujet, voici une synthèse unique, richement illustrée de graphes et schémas explicatifs, pour s'y retrouver dans l'avalanche de chiffres et de données et comprendre les enjeux cruciaux de la transition énergétique.

Editions Belin 2014
384 pages - 29,90 € - 978-2-7011-6440-3

BON DE COMMANDE

À 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 : _____

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
SCIENCE
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1772
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.

LOGIQUE & CALCUL

De l'art avec les fractales

L'exploration de l'univers mathématique des fractales avec un ordinateur est un art analogue à la découverte esthétique du monde avec un appareil photo.

Jean-Paul DELAHAYE

On ne crée pas les objets mathématiques, on les découvre, affirme un philosophe réaliste des mathématiques. Pourtant, leur variété est si grande qu'accéder aux plus intéressants ou aux plus beaux exige un délicat savoir-faire et du talent.

Nul ne met en doute que les motifs géométriques et décoratifs islamiques, que l'on admire par exemple à l'Alhambra de Grenade ou au palais de la Bahia à Marrakech, sont l'œuvre de grands artistes. Ces structures mathématiques préexistaient à leur matérialisation sur les murs, mais leur sélection parmi l'infinité des possibilités est un acte artistique créateur.

Qui est le dessinateur ?

Adoptons une posture analogue pour les « images fractales » qui, comme les pavages décoratifs, sont des structures géométriques déterminées par des formules, et examinons quelques questions sur le sujet :

– L'auteur doit-il être le concepteur du programme qu'il utilise ? En appuyant sur quelques touches du clavier, a-t-il sélectionné un jeu de paramètres qui, après les calculs menés par la machine, lui a fourni un dessin susceptible d'être obtenu par n'importe qui ?

– Les créateurs des images ne sont-ils pas ceux qui ont inventé les formules et écrit les programmes, travail délicat et long ?

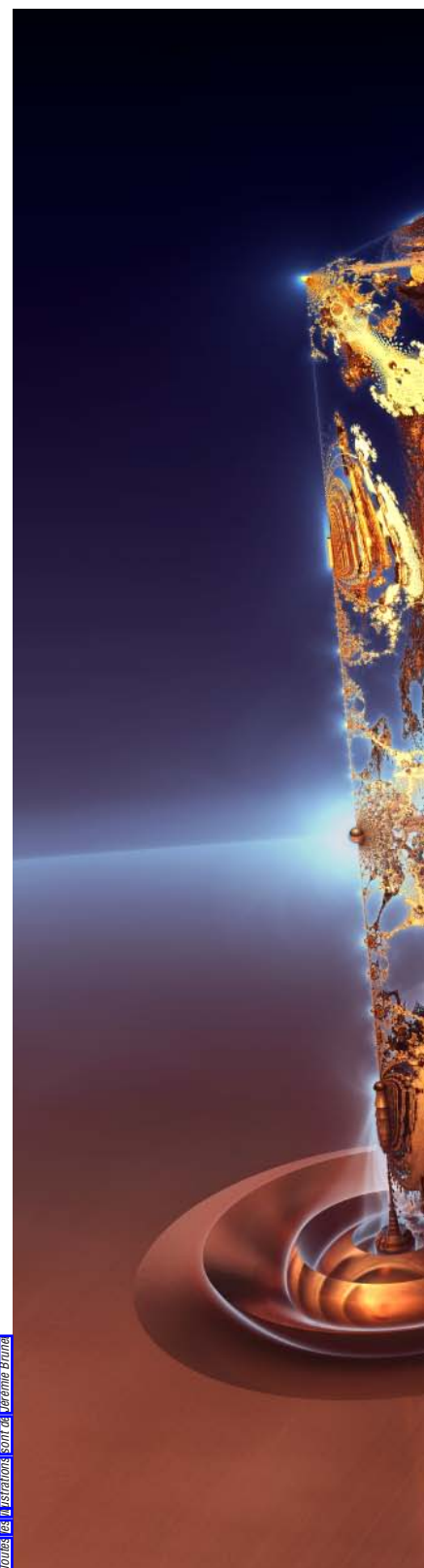
– Le calcul et donc les mathématiques sont-ils à l'origine de ces splendeurs, et cet art est-il sans créateur ?

Nous répondrons *non* à chacune de ces questions !

Comme pour tous les arts géométriques, dont celui des mosaïques de Grenade, le fait que l'œuvre soit identifiable comme un objet géométrique ou mathématique ne doit pas contredire l'idée que des artistes ont choisi et exposé une forme ; il a fallu travailler, explorer et faire preuve d'imagination. Une maîtrise technique et un travail minutieux ont été nécessaires pour

JÉRÉMIE BRUNET A CRÉÉ POUR CET ARTICLE cette image intitulée *Treasure*. Il s'agit d'une *Mandelbox*, un objet fractal à trois dimensions découvert par Tom Lowe en 2010 ; la fonction que la *Mandelbox* itère a la particularité d'utiliser des transformations conformes de l'espace (transformations qui conservent les angles). La richesse des structures de la *Mandelbox* et sa capacité à produire des variantes intéressantes en ont fait une des formules préférées des créateurs de fractales 3D. Les paramètres numériques utilisés pour cette image sont plus simples que ceux de la formule « standard ». L'artiste a recherché une harmonie graphique en épurant la formule au maximum tout en maintenant une grande diversité des motifs.

La *Mandelbox* est expliquée par exemple dans un article de Jos Leys (<http://images.math.cnrs.fr/Mandelbox.html>) et dans le livre de Jérémie Brunet.



TOUS LES DROITS SONT RÉSERVÉS



que la structure soit matérielle et durable. Qu'un ordinateur et des programmes interviennent dans le processus de création ne doit pas nous faire nier que ces œuvres sont élaborées. Dans la photographie et le cinéma, les artistes utilisent de nombreux dispositifs techniques, dont l'ordinateur qui joue un rôle pour les effets spéciaux, l'ajustement et la correction des paramètres de luminosité et de contraste, etc. L'utilisation d'outils techniques n'exclut pas qu'il y ait un travail, de l'imagination, du talent, voire du génie.

Les programmes qui calculent des fractales produisent certes facilement des images étonnantes, comme les appareils photo numériques qui se règlent automatiquement sans demander de compétence; mais seul celui qui les manipule, qui explore leur potentialité, fait acte de création.

Un autre facteur complique l'évaluation des productions par ordinateur : les outils informatiques évoluent très vite et il est délicat de distinguer ce qui se fait tout seul et ce qui exige efforts et savoir-faire. La loi de Gordon Moore selon laquelle les performances informatiques sont décuplées tous les cinq ans environ autorise l'exploration d'objets mathématiques qui étaient hors de portée, notamment des fractales en trois dimensions.

Une évolution récente

Depuis 2010, l'idée des hybridations (voir l'encadré ci-dessous) a été mise en œuvre pour la création de fractales 3D. Grâce à ce passage dans l'espace, l'art fractal propose des formes analogues à celle du monde réel, mais sublimées, enrichies et

géométriquement parfaites. En 2015, une multitude de logiciels prennent en compte les nouveaux procédés mathématiques de création de fractales. Le véritable créateur se donne le temps de parcourir les espaces rendus accessibles par les logiciels, de s'y promener, d'y tracer ses propres chemins, d'orienter son regard pour y découvrir des trésors cachés. Comme en photographie, ses visions sont personnelles et inimitables.

L'un des artistes est Jérémie Brunet, qui vient de publier *L'art fractal. Aux frontières de l'imaginaire* (Pole, 2014). Ce livre offre près de 150 images de fractales 3D. La richesse, la variété et la beauté d'un monde nouveau éblouissent et subjuguent. Le principal logiciel qu'il utilise se nomme *mandelbulb3D*, qu'a développé un certain Jesse (c'est un pseudonyme). Jérémie

L'hybridation, source

Les dessins fractals ont longtemps été bidimensionnels, voire tridimensionnels, mais déduits simplement de méthodes liées à la dimension 2. En particulier, on ne connaissait pas d'équivalent dans l'espace 3D de l'ensemble de Mandelbrot, autrement dit l'ensemble des points c du plan complexe tels que la suite $0, f(0), f(f(0)), f(f(f(0))), \dots$, où $f(z) = z^2 + c$, reste bornée.

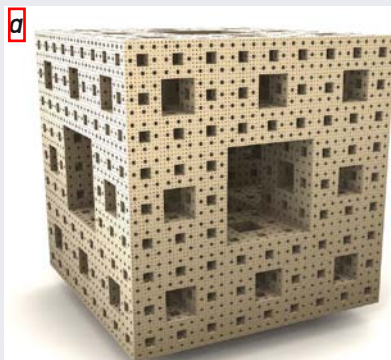
À partir de 2009, des méthodes, consistant dans un premier temps à trouver des adaptations, à la dimension 3, de l'opération $z \rightarrow z^2$ pour $z = x + iy$

complexe, ont permis de progresser, c'est-à-dire de disposer d'algorithmes efficaces et simples produisant des objets fractals de dimension 3.

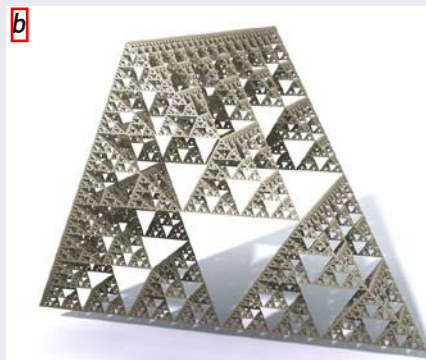
Des avancées dans les algorithmes de représentation des fractales 3D (par exemple les algorithmes dits de *ray marching*) et leur programmation ont multiplié les possibilités, ouvrant les portes à une formidable variété de formes et d'images, et à l'expression d'une sensibilité artistique nouvelle : l'art fractal.

Parmi les méthodes utilisées, l'hybridation est une source féconde. L'idée est de prendre non

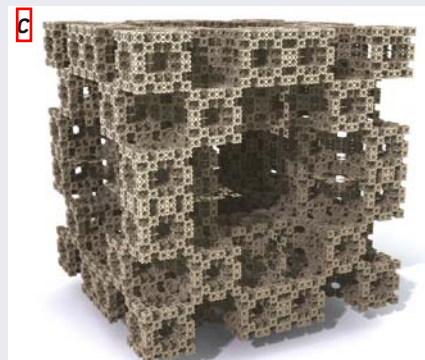
pas une seule fonction f et de déterminer la présence ou non dans la fractale du point de coordonnées (x, y, z) en observant le comportement de la suite $(x, y, z) \rightarrow f(x, y, z) \rightarrow f(f(x, y, z)) \rightarrow f(f(f(x, y, z))) \rightarrow \dots$, mais de considérer deux fonctions (ou plus) f et g déjà connues pour engendrer des fractales et de déterminer les points de la fractale selon la suite provenant de l'utilisation à la fois de f et de g .



Eponge de Menger [M]



Fractale 3D de Sierpinski [S]



Hybride MSMS

Brunet a suivi et influencé les évolutions et les perfectionnements du logiciel, produisant des images qui étonnent Jesse lui-même.

Une partie importante des images de Jérémie Brunet est obtenue par la méthode d'hybridation. Il combine deux à six formules selon des « rythmes » variés. Cette méthode permet de considérer plusieurs fractales de base et de les combiner (*voir les figures ci-dessous*). Le choix des paramètres de rendu transforme ces objets en œuvres. Jérémie Brunet est aussi connu pour ses films, promenades dans le monde des fractales 3D (www.youtube.com/user/bib993). Et les sculptures qu'il réalise en utilisant les techniques de l'impression 3D permettent de toucher les nouvelles formes mathématiques (www.shapeways.com/shops/3dfractals).

La précision, la délicate unité résultant de l'utilisation d'un même algorithme mathématique dans toutes les parties de l'œuvre, les subtiles répétitions approximatives de structures complexes, la disposition de tout cela dans l'espace en respectant les règles de la perspective et l'ajout d'une série soigneusement choisie d'effets photographiques, tout cela est inconcevable sans machine.

Trois étapes de création

Le travail à l'origine des images fractales se décompose en trois étapes.

La première est celle des formules et des procédés de calcul. L'agilité et l'expertise mathématiques sont à l'œuvre : il a fallu attendre 2009 pour que des formules produisant des structures fractales

tridimensionnelles pleinement satisfaisantes soient élaborées.

La seconde étape est celle, informatique, de la mise au point et du perfectionnement des techniques de visualisation, et de leur programmation. Pour obtenir de bons rendus, il faut non seulement s'appuyer sur les formules et procédés mathématiques découverts dans la première étape, mais aussi utiliser des algorithmes de représentation en trois dimensions, dont certains doivent être adaptés ou réinventés.

Ainsi, en infographie, pour obtenir de bons rendus, on décompose souvent les éléments d'une scène en triangles très nombreux tirés des équations des faces ou des surfaces qui délimitent les objets présents. Or ce n'est pas possible directement avec les images fractales 3D, car les objets qu'on cherche à figurer se présentent

d'images fractales

On peut par exemple utiliser la

règle :

$$(x, y, z) \rightarrow f(x, y, z) \rightarrow g(f(x, y, z)) \rightarrow f(g(f(x, y, z))) \rightarrow \dots$$

Des schémas d'utilisation plus complexes, du type $(f, f, g, g, \dots)$, $(f, g, f, f, g, f, f, g, \dots)$, etc., ouvrent d'autres possibilités. En voici quelques-unes :

- L'éponge de Menger

$(f, f, f, f, \dots)$, ou M (*image a*).

- La fractale 3D de Sierpinski

$(g, g, g, g, \dots)$, ou S (*image b*).

- L'hybride MSMS...

$(f, g, f, g, \dots)$ (*image c*).

- L'hybride SMSM...

$(g, f, g, f, \dots)$ (*image d*).

- L'hybride SMMSMM...

$(g, f, f, g, f, f, \dots)$ (*image e*).

- L'hybride MSSMSS...

$(f, g, g, f, f, g, g, \dots)$ (*image f*).

Selon une autre hybridation, à partir de deux fonctions donnant des fractales, on construit une troisième avec la fonction $h = \alpha f + (1 - \alpha)g$ (avec α compris

entre 0 et 1). En faisant varier le paramètre α , on passe continûment de la fractale associée à f à celle associée à g . Le livre *L'art fractal. Aux frontières de l'imagerie* de Jérémie Brunet utilise de nombreuses hybridations.

Parmi les logiciels permettant de créer des images fractales 3D, citons :

Apophysis (<http://apophysis.org/>), Incendia (<http://www.incendia.net/>),

Fragmentarium (<http://syntopia.github.io/Fragmentarium/>),

Mandelbulb3D (<http://mandelbulb.com/>),

Mandelbulber (<http://sourceforge.net/projects/mandelbulber/>), Ultrafractal (<http://www.ultrafractal.com/>),

Xenodream (<http://www.xenodream.com/>).

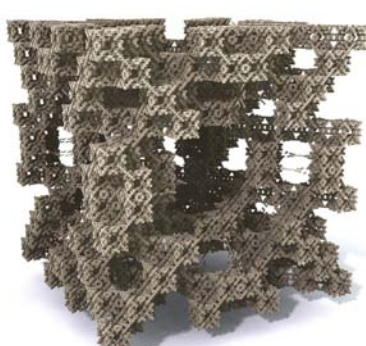
D'autres informations sont disponibles sur www.fractalforums.com.

d



Hybride SMSM

e



Hybride SMMSMM

f



Hybride MSSMSS



ŒUVRES D'ART MATHÉMATIQUES.

L'auteur de ces réalisations 3D de fractales, Jérémie Brunet, est aujourd'hui l'un des principaux artistes « fractalistes ». Depuis son plus jeune âge, ce Français est passionné par ce type de créations, ce qui l'a conduit à en suivre les développements. En particulier, depuis 2009, année de la découverte de procédés nouveaux pour créer des fractales en trois dimensions, il a produit des œuvres qui ont été exposées dans le monde entier. Il vient de publier un livre, mais il réalise aussi de nombreux films, des sculptures et des bijoux.



le plus souvent comme de simples ensembles de points dont on ignore tout des faces qui les délimitent. Les fractales 3D sont en effet souvent définies comme des ensembles de voxels (l'équivalent des pixels de la dimension 2). On itère un calcul en partant des coordonnées du voxel :

$$(x, y, z) \rightarrow f(x, y, z) \rightarrow f(f(x, y, z)) \rightarrow \dots$$

et, selon le comportement de la suite obtenue, on en déduit si le voxel appartient à la fractale. On utilise aussi cette suite pour fixer la couleur. Ce mode de définition impose des méthodes particulières de représentation. La qualité de la programmation est aussi importante et la quantité de calcul pour arriver à une image satisfaisante contraint parfois à faire des approximations : on développe donc un ensemble de techniques spécifiques aux dessins de fractales 3D.

La troisième étape est celle de la production d'images, de films ou de sculptures. C'est l'étape créative. Parfois, l'artiste profitera d'un artefact des calculs pour obtenir une image encore plus étrange que celle de la réalité mathématique. C'est l'analogie des photos brouillées, des tirages surexposés ou des éclats lumineux parasites que les photographes exploitent délibérément pour produire des images singulières.

Une conception globale

Notons bien (peut-être est-ce ce qui dérange ?) que la conception d'une image par l'artiste ne se fait pas pixel par pixel comme pour une peinture où l'artiste dépose progressivement les pigments sur sa toile par petites quantités. La conception ici est globale, l'artiste ne sait pas toujours précisément ce qu'il va obtenir, mais il sait que telle modification produit tel effet, que choisir les éclairages selon telle méthode donne une certaine atmosphère, que telle palette de couleurs convient, etc. Il sait aussi reconnaître une zone prometteuse et s'en approcher.

N'oublions pas que l'exploration des fractales 3D est un jeu à quatre degrés de liberté principaux : les trois directions de l'espace habituel et le grossissement. En réalité, à côté de ces quatre paramètres

principaux, il y a aussi ceux de l'orientation du regard (deux paramètres), ceux de la couleur et des effets de matière (faire en sorte que la fractale semble en or, par exemple), ceux de l'éclairage, ceux de la transparence, et ceux spécifiques à chaque forme fractale qu'on explore, et ils peuvent être nombreux.

Le travail fait autour des fractales, et en particulier des fractales 3D, est un travail scientifique. On explore des objets mathématiques et on en crée. On tente donc de connaître un domaine mathématique. On met au point des outils, algorithmes et programmes permettant d'y accéder et de mieux le percevoir et le comprendre. Ce travail mathématique et scientifique est très éloigné du travail habituel. L'essentiel des efforts n'est pas de démontrer des théorèmes (il y en a, mais tout ne tourne pas autour d'eux), mais de trouver des structures esthétiques. Les mathématiciens affirment être attachés à la beauté des démonstrations, des théories et des objets qu'ils manipulent, mais leurs visions ne sont pas celles de l'art fractal.

La communauté de l'art fractal communique par des réseaux sociaux et des forums (www.fractalforums.com/), plus que par des articles scientifiques. De tels articles sont tout de même présents dans les revues et les conférences d'infographie, mais ils traitent principalement des méthodes générales de représentation. Les échanges se font principalement par la publication d'images et de films sur des sites internet tels que *DeviantArt* (www.deviantart.com/) ou *Flickr*.

Assez peu d'argent tourne autour de tout cela ; pratiquement tout est fait pour le plaisir et l'échange social, et il n'y a guère de postes académiques liés, le travail fait ne s'insérant pas dans les disciplines traditionnelles.

Il n'y a pas qu'une seule façon de faire des mathématiques, qui serait la méthode définition-théorème-démonstration. Explorer l'univers des formules à la recherche de celles qui produisent des effets extraordinaires, ou un important rapport entre complexité apparente et complexité des formules en est une autre. Répertoire des méthodes, comprendre pourquoi elles

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'Université de Lille et chercheur

au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

BIBLIOGRAPHIE

J. Brunet, *L'art fractal. Aux frontières de l'imaginaire*, Pole, 2014.

M. Hvidtfeldt, *blog Syntopia* (donne de précieuses informations techniques), 2014, <http://blog.hvidtfeldts.net/>

J. Leys, articles sur le site *Images des Maths*, 2010 : *Un ballon de foot fractal*, <http://images.math.cnrs.fr/Un-ballon-de-foot-fractal.html> *Mandelbox*, <http://images.math.cnrs.fr/Mandelbox.html> *Mandelbulb*, <http://images.math.cnrs.fr/Mandelbulb.html>

C. Pöppe, *Du relief pour les fractales*, *Pour la Science* n° 395, septembre 2010.

B. Mandelbrot, *Fractals and an art for the sake of science*, *Leonardo*, supplemental issue, pp. 21-24, 1989.



TRANTOR DESERT est le titre de cette autre œuvre de Jérémie Brunet. Trantor désigne la planète capitale de l'Empire galactique, dans les romans d'Isaac Asimov (*Cycle de l'Empire* et *Cycle de Fondation*).

fonctionnent, comment elles se combinent est une activité de nature mathématique.

La répugnance des mathématiciens à sortir du schéma axiomatique a déjà eu comme conséquence que les probabilités (domaine où la modélisation est importante et n'est pas une activité de type définition-théorème-démonstration) et la logique mathématique (où les aspects philosophiques des problèmes organisent une part importante du travail) n'ont été acceptées que tardivement.

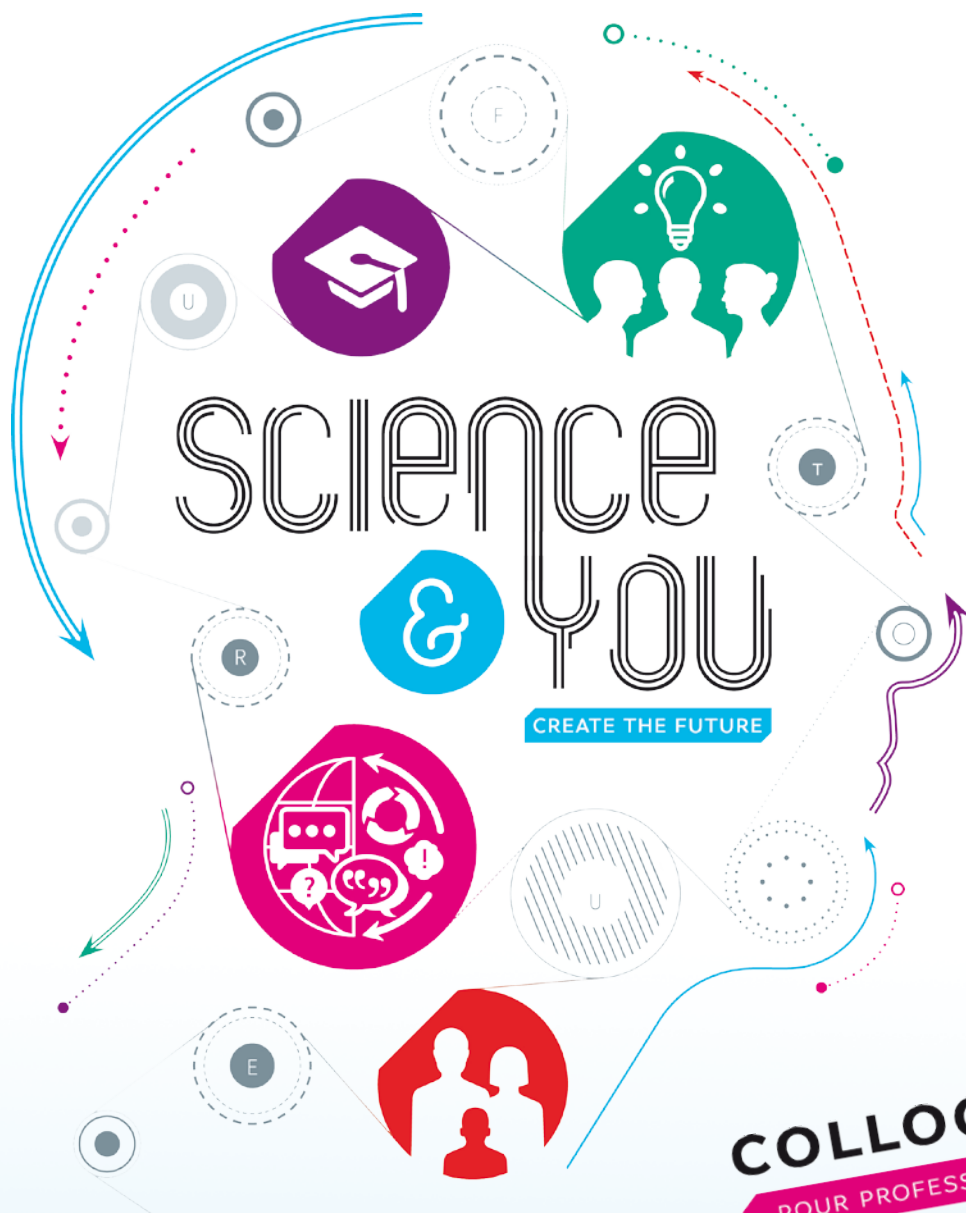
Vers la reconnaissance ?

Il est peu probable que la communauté mathématique soit prête à englober l'activité d'élaboration de méthodes nouvelles pour étendre le domaine des fractales et en maîtriser mieux la production et l'exploration. Mais gageons qu'à long terme, il est inévitable que cette reconnaissance se produise.

Le travail de pionnier de Benoît Mandelbrot sur les fractales a lui aussi été hors norme et hors circuit. Se moquant un peu des usages et de la frontière des disciplines, il a été un moteur essentiel au développement d'une multitude de travaux utilisant l'idée des fractales. Ces travaux ont touché les mathématiques, la physique, la biologie, l'astrophysique, l'économie et l'art. Aujourd'hui, des dizaines de livres et des milliers d'articles ont été écrits sur les fractales, qui sont un sujet transversal concernant toutes les sciences et bien au-delà. Leur existence, comme l'émergence d'un authentique art fractal, perturbe nos certitudes sur les frontières entre la science et l'art. ■



Retrouvez la rubrique
Logique & calcul sur
www.pourlascience.fr



2 AU 6 JUIN 2015
NANCY | FRANCE
CENTRE PROUVÉ

**UN ÉVÉNEMENT CULTUREL ET SCIENTIFIQUE
D'ENVERGURE INTERNATIONALE
4 JOURS DE CONFÉRENCES, D'ATELIERS ET D'ANIMATIONS !**

COLLOQUE
POUR PROFESSIONNELS
FORMATION
POUR DOCTORANTS
FORUM
SCIENCES & CULTURES
**ÉVÉNEMENTS
CULTURELS**
SUR LES SCIENCES



science-and-you.com
[#SciYou2015](https://twitter.com/SciYou2015)

SCIENCE & FICTION

Tempête de sable sur Dune

Balayée par le vent, la planète Dune, au cœur d'une tragédie grecque futuriste, est recouverte d'un désert de sable. Ce paysage est-il réaliste ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

S'il est une planète imaginaire célèbre, c'est bien Arrakis, plus connue sous le nom de Dune. Ce corps céleste est le principal lieu d'action du roman éponyme de Frank Herbert, publié en 1965 et devenu une œuvre incontournable de la science-fiction. Dans ce splendide *space opera*, l'univers connu est gouverné par un tyran, l'empereur Shaddam IV, qui sera renversé par la révolte des natifs de Dune (les *Fremens*) guidés par leur nouveau chef, Paul Atréides. Au cours des nombreux opus de la saga, l'auteur prend un soin particulier à décrire le monde où se déroulent les diverses intrigues et autres complots. Aussi fictive soit-elle, Arrakis soulève des questions en matière de géologie et de planétologie. Sans équivalent dans le Système solaire, un tel corps est-il plausible dans d'autres systèmes planétaires ?

Dune, comme Tatouine dans la saga *Star Wars*, est une planète tellurique et désertique, une « exo-Terre » au climat très aride. Mais si Tatouine présente de nombreux canyons, montagnes et vallées, Dune est principalement recouverte de sable, à l'exception de quelques rochers, d'une grande falaise et d'une calotte glaciaire très réduite au Nord – elle n'apparaît d'ailleurs pas dans l'adaptation du roman au cinéma par David Lynch (1984). Les précipitations y sont quasi nulles et sa surface est balayée en permanence par de violentes tempêtes de sable dont les vents peuvent atteindre plusieurs centaines de kilomètres par heure.



LA SAGA *DUNE* de Frank Herbert a été enrichie par de nombreux ouvrages de son fils Brian Herbert et du romancier Kevin Anderson, tel *La Maison des Atréides* (ci-dessus), qui trace la jeunesse du duc Leto Atréides.

Du vent, du sable, des dunes : sur Terre, un tel paysage évoque le désert ou la plage (on parle alors de dunes littorales). À l'intérieur des continents, il est souvent le résultat de l'aridification et de la dégradation des sols, processus mieux connu sous le terme de désertification. Ce phénomène, amplifié par le réchauffement climatique, symbolise la mort environnementale d'une région, voire d'une planète tout entière à la suite d'une catastrophe écologique majeure. Ce n'est pas pour rien que les déserts servent aussi de décors aux œuvres dites « post-apocalyptiques » comme *Mad Max* (dont un nouvel opus réalisé par George Miller sortira en mai 2015).

Dans son roman, Herbert nous explique que la désertification de Dune a été causée non pas par la folie des hommes, mais par l'introduction d'une espèce exotique, le ver géant des sables, dont les larves (nommées « truites des sables » par les *Fremens*) ont besoin de beaucoup d'eau pour atteindre leur taille adulte – estimée à près de 400 mètres de long ! Ces vers géants, qui ne supportent plus l'eau une fois arrivés à maturité, secrètent l'Épice, une drogue psychoactive très prisée dans la Galaxie car elle prolonge la vie et permet de courber l'espace pour voyager d'une étoile à une autre.

En géomorphologie, il existe plusieurs types de déserts. Le paysage rencontré sur la planète Dune se rapproche de ce que l'on nomme sur Terre un erg. Dérivé de l'arabe « irq », ce terme désigne un désert de dunes,



COUVERTE DE SABLE, LA PLANÈTE DUNE présente aussi une falaise dans l'hémisphère Sud. Celle-ci empêche les vers géants d'envahir le reste de l'astre. Sa forme en marches d'escalier (ou « grabens ») trahit une intense activité tectonique.

c'est-à-dire une zone où le sable est déposé par le vent – on parle de sédimentation éolienne. Il se distingue du reg, désert de pierre correspondant à une zone caillouteuse où les fines particules sont arrachées par le vent – on parle cette fois d'érosion éolienne. Notons que ces particules peuvent être transportées sur de grandes distances. Ainsi, le sirocco, vent saharien très sec, traverse la mer Méditerranée et peut déposer du sable jusqu'au cœur des Alpes !

Reg et erg sont donc intimement liés, le premier fournissant une grande partie de la matière première – le sable – au second. Dans le Sahara par exemple, les dunes représentent seulement 20 % de la superficie totale du désert. Ce n'est pas le cas sur Arrakis, dont la surface ne présente aucun reg... Mais alors d'où vient le sable de Dune ?

Sur Terre, le sable naturel est un matériau très particulier et de plus en plus rare, notamment à cause de son exploitation : environ 15 milliards de tonnes sont consommées chaque année surtout pour la maçonnerie et la fabrication du verre. Sédiment détritique, il peut avoir une origine minérale (il résulte de l'érosion de roches sédimentaires, magmatiques et métamorphiques) ou organique (il est alors composé de débris de coquilles, corail, etc.). Sa composition varie donc en fonction de son origine, celle-ci pouvant être renseignée par la couleur dominante : un sable blanc est souvent coquillier (c'est-à-dire calcaire), parfois gypseux. Noir, il est plutôt volcanique, tan-

dis que rouge, comme sur Mars, il témoigne de la présence d'oxydes de fer. Le sable de Dune est jaune, ce qui suggère une composition plutôt à base de silice, comme c'est le cas de la majorité des sables terriens. L'adaptation de David Lynch a d'ailleurs été réalisée dans le désert du Mexique : le tournage a duré un an et s'est effectué dans des conditions très difficiles, car d'authentiques tempêtes de sable ont régulièrement causé des dégâts.

Mer, vent et vers : aux origines du sable

Sur Dune, la présence d'une telle quantité de sable siliceux implique l'existence d'une croûte de roches silicatées en profondeur. Cette hypothèse est confirmée par le mode de vie des Fremens décrit dans le roman : ils vivent en sous-sol, dans des anfractuosités et des grottes, et récupèrent l'eau dans des réserves souterraines. Cette croûte de roches pourrait s'éroder en formant du sable en surface. Les vents violents qui fouettent la surface de Dune ne sont pas les seuls agents érosifs qui donnent du sable. La tectonique des plaques formant des reliefs qui s'érodent et se transforment en sable est une possibilité. La présence d'une énorme falaise – qui cantonne les vers dans la partie Sud de la planète – est un signe d'une tectonique des plaques active. La mer est aussi une source d'érosion. Herbert mentionne la présence de

grandes étendues de sable salé qui témoigneraient de la présence ancienne d'une mer sur Dune. Enfin, les vers géants eux-mêmes peuvent participer à la formation du sable car ils sont psammivores, c'est-à-dire qu'ils se nourrissent des matières organiques contenues dans les sédiments (un peu comme les arénicoles ou « vers de vase » qui existent réellement).

Par ailleurs, un ver géant d'environ 400 mètres de long et 80 mètres de diamètre, même s'il est en partie creux, a une masse considérable que nous estimons à plus de 800 000 tonnes. Pour que de tels animaux puissent évoluer sans trop de peine sur et dans le sable, il faut aussi que la gravité de Dune soit assez faible. Ainsi, la planète Mars, notre voisine, a de nombreux points communs avec Arrakis : une gravité faible, un environnement désertique rocheux qui présente aussi des champs dunaires de formes très variées. La différence entre les deux planètes est peut-être dans l'atmosphère ténue de Mars. L'érosion y est peu intense et les dunes s'y forment et se modifient lentement. Si l'atmosphère était plus épaisse, l'érosion aurait remodelé la surface de la planète à l'image d'Arrakis. Ainsi, on peut penser que, quelque part dans la Galaxie, il existe une exoplanète ressemblant à Dune. ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

ART & SCIENCE

Artistes et climat : des relations qui se réchauffent

Les artistes s'emparent de plus en plus des questions climatiques. Par exemple, l'Argentin Tomás Saraceno nous invite à envisager des modes de vie différents en prévision des bouleversements à venir.

Loïc MANGIN

Vendredi 13 février, à Genève, s'est achevée la première session préparatoire de la Conférence mondiale sur le climat (la COP 21) qui aura lieu à Paris du 30 novembre au 11 décembre 2015. Après une semaine de tractations, 195 États sont tombés d'accord sur un texte sur lequel s'appuieront les futures négociations visant à maintenir le réchauffement sous la barre des deux degrés. Ce premier

« succès » encourageant coïncide avec le dixième anniversaire du protocole de Kyoto, entré en vigueur le 16 février 2005. C'était le premier traité mondial de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Le climat va ainsi occuper le devant de la scène au cours des prochains mois, au moins jusqu'au début de 2016. Il sera au cœur des préoccupations des diplomates, des gouvernements, des délégués... Mais ces personnages officiels ne sont pas les

seuls à s'emparer du sujet. Depuis quelques années, on doit aussi compter avec des artistes, de plus en nombreux à faire des enjeux planétaires un thème central de leurs œuvres. Et ils s'organisent !

Par exemple, *Art of Change 21* est une association créée en 2014 en vue de la COP 21. Elle réunit artistes, entrepreneurs sociaux et personnalités engagées contre le réchauffement climatique. Son ambition est de peser suffisamment sur la conférence. Parmi les artistes acteurs du projet, figurent Olafur Eliasson, l'un des parrains de l'initiative, le photographe Pierre de Vallombreuse, Liao Wenfeng, Nathalie Jeremijenko, etc. *Art of Change 21* est labellisé « Agenda Positif » par le comité de pilotage ministériel de la COP 21.

Attardons-nous sur un artiste qui est lui aussi concerné par les risques liés au changement climatique. L'Argentin Tomás Saraceno était l'un des invités de l'exposition *Rethink – Contemporary Art & Climate Change* présentée dans quatre lieux culturels de Copenhague. C'était en décembre 2009, quand la capitale danoise accueillait la... COP 15 !

L'artiste y présentait ses *Biosphères* (photographie page ci-contre, lors d'une exposition à Berlin). Ce sont des bulles de



In Orbit est une toile d'araignée géante ponctuée de sphères transparentes. Elle est visible et praticable jusqu'à la fin de l'année 2015 au Kunstsammlung Nordrhein-Westfalen, à Düsseldorf, en Allemagne.

Rendez-vous

plastique suspendues, le public pouvant pénétrer dans deux d'entre elles. D'autres contiennent de l'eau, d'autres encore abritent des plantes. On peut voir dans ces bulles une métaphore de ce que pourrait être le destin de nos descendants : vivre reclus dans des milieux confinés, coupés du reste de la planète devenu inhospitalier. Selon Tomás Saraceno, c'est bien le rôle de l'art : « nous faire réfléchir à des choses que l'on pensait établies. »

Ses œuvres, inspirées par des bulles de savon, les toiles d'araignées (*voir sa dernière installation page ci-contre*), les réseaux de neurones, la forme des nuages... invitent à

poser un regard différent sur l'environnement et à imaginer des modes de vie alternatifs.

On a longtemps reproché aux artistes de ne pas s'intéresser au changement climatique et à ses conséquences. Cette époque semble aujourd'hui révolue. L'art joue désormais un rôle dans l'ancrage de la question climatique dans le monde réel, ancrage qu'appellent de leurs vœux le sociologue Stefan Aykut et l'historienne des sciences Amy Dahan dans *Gouverner le climat ?*, leur dernier ouvrage. ■

Tomás Saraceno : www.tomassaraceno.com
Art of Change 21 : <http://artofchange21.com>

Les *Biosphères* de Tomás Saraceno exposées en 2011 et 2012 au Musée d'Art contemporain de Berlin, situé dans l'ancienne gare de Hambourg.



IDÉES DE PHYSIQUE

Le tireur embusqué des mangroves

Le poisson-archer projette sur ses proies un puissant jet d'eau. Une technique de chasse dont l'efficacité repose sur un contrôle hydrodynamique précis.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Tout fut tellement rapide que Dédée l'araignée n'a pas compris ce qui lui arrivait. Accrochée sous une feuille, elle ne vit pas le projectile liquide monter vers elle à plus de 20 kilomètres à l'heure. Le choc fut violent : trou noir, chute et fin de vie dans le gosier de Toxote, le tueur des mangroves, un des membres du gang des poissons-archers. Comment opère ce tueur en série, du clan *Toxotes jaculatrix* ? Nos limiers physiiciens mènent l'enquête.

Nous nous renseignons auprès d'un de nos indicateurs, Léon le Caméléon, un expert

dans l'attaque à distance. « Dégommer les insectes, ce n'est pas pour les bleus », nous explique-t-il. « Araignées, lucioles et autres friandises sont solidement accrochées à leur végétal, avec une force de 20 à 40 millinewtons. Si vous voulez les atteindre à distance et les décrocher, il faut asséner un coup puissant. »

Léon nous révèle que, pour projeter sa langue à 20 kilomètres par heure, il stocke progressivement l'énergie dans des fibres élastiques de collagène. Il relâche alors ses muscles, qui agissent comme une gâchette libérant un ressort : la langue se détend en

1/25^e de seconde avec une puissance de 3 000 watts par kilogramme, six fois plus que celle atteinte par un muscle de vertébré. Et Toxote, notre suspect, comment fait-il pour concentrer la puissance ?

La puissance concentrée à l'avant du jet

Nous commençons donc à examiner en détail le poisson-archer. L'anatomie et la physiologie de sa bouche ne montrent hélas aucune trace de mécanisme amplificateur ou de stockage d'énergie. On voit juste que sa langue peut s'appuyer contre un sillon tracé dans son palais et former comme un canon de fusil où l'eau s'engouffre lorsque le poisson referme ses branchies. Ferions-nous fausse route ? Une planque s'impose afin d'observer le mode opératoire du poisson.

Toxote ne perd pas de temps : il s'approche de la surface et émet un jet qui atteint sa proie, située 60 centimètres plus haut, en moins de 0,2 seconde. Décrochée, elle tombe à l'eau et le poisson-archer l'avale sur-le-champ. Mais comment parvient-il à concentrer assez d'énergie dans son projectile liquide ? L'analyse au ralenti de son forfait va nous renseigner.

Grâce à nos experts de l'Université de Bayreuth, le biophysicien Stefan Schuster et sa doctorante Peggy Gerullis, on constate que durant son avancée vers la cible, la tête du jet d'eau grossit et gagne en vitesse, passant de trois mètres par seconde en début

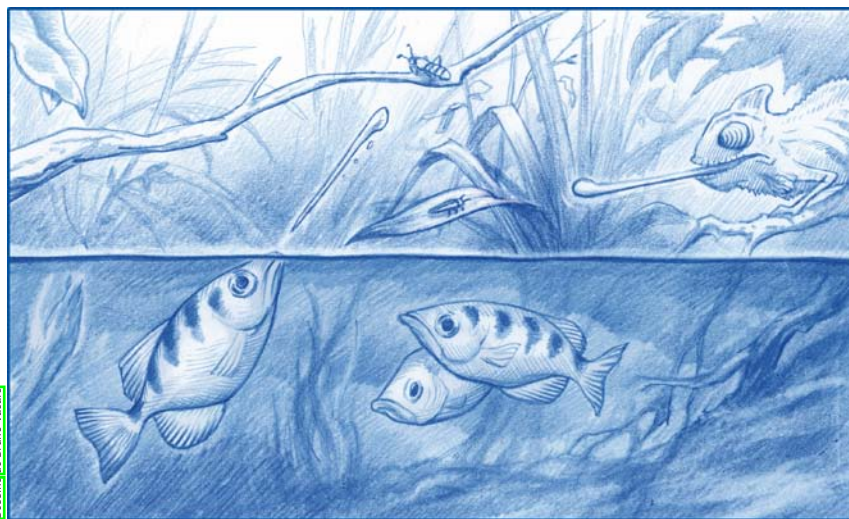


ILLUSTRATION : J. B. BENOÎT

LES POISSONS-ARCHERS, appartenant au genre *Toxotes*, vivent dans les estuaires et mangroves du Sud de l'Asie. Ils émettent un jet d'eau suffisamment précis et puissant pour faire tomber une proie perchée au-dessus de l'eau, à des hauteurs pouvant aller jusqu'à trois mètres.

de jet à six mètres par seconde en fin de jet. Il y a donc bien concentration d'énergie, mais elle a lieu non pas dans l'organisme, avant l'envoi du projectile, mais en dehors, une fois que ce dernier est lancé.

Comment s'effectue cette concentration d'énergie ? L'astuce du poisson-archer est d'émettre un jet d'eau à une vitesse qui augmente progressivement. De cette façon, le front du jet est rattrapé par des parties liquides éjectées plus tard et qui sont plus rapides. Autrement dit, la tête du jet gagne à la fois en masse et en vitesse. Le liquide, éjecté de la bouche avec une faible puissance sur une relativement longue durée, arrive sur sa cible sur une durée bien plus courte, donc avec une puissance accrue.

Plus remarquable encore, l'analyse des tirs visant des proies placées à des hauteurs variées (de 20 à 60 centimètres) montre que Toxote parvient à ajuster la distance de focalisation de la puissance du jet. Pour ce faire, il joue à la fois sur la durée de l'émission et sur la vitesse d'éjection : plus la proie est distante, plus la durée de l'émission est longue et la variation de vitesse le long du jet importante.

L'instabilité du jet évitée

Avons-nous complètement éclairci le mystère de l'arme des crimes ? Notre second groupe d'experts, sous la houlette du physicien Alberto Vailati, à l'Université de Milan, avance deux éléments qui nous permettent d'en douter.

D'abord, l'eau étant incompressible, le front du jet qui grossit lorsqu'il est alimenté

par l'arrière ne devrait-il pas s'étaler transversalement plus qu'il ne le fait (environ un centimètre) ? Cela lui ferait perdre de sa puissance d'impact, puisque seule la portion du front qui frappe la cible agit.

Par ailleurs, si les experts de Bayreuth ont reproduit le mécanisme de l'arme du crime avec une seringue sur laquelle on appuie de plus en plus fort, ils ont constaté que le jet émis par l'instrument se brise souvent. Or cela disperse la puissance hydrodynamique.

Dans le cas d'un filet d'eau parfaitement cylindrique et régulier, cette fragmentation porte le nom d'instabilité de Rayleigh-Plateau. Il s'agit d'une manifestation de la tension superficielle. On peut assimiler la surface du liquide à une mince pellicule élastique, qui doit être la moins étendue possible. Après son émission, le filet liquide se met à onduler légèrement dans son épaisseur, avec une périodicité proportionnelle au diamètre du cylindre ; par un mécanisme d'instabilité, l'amplitude des ondulations augmente jusqu'à découper le filet en un chapelet de gouttes.

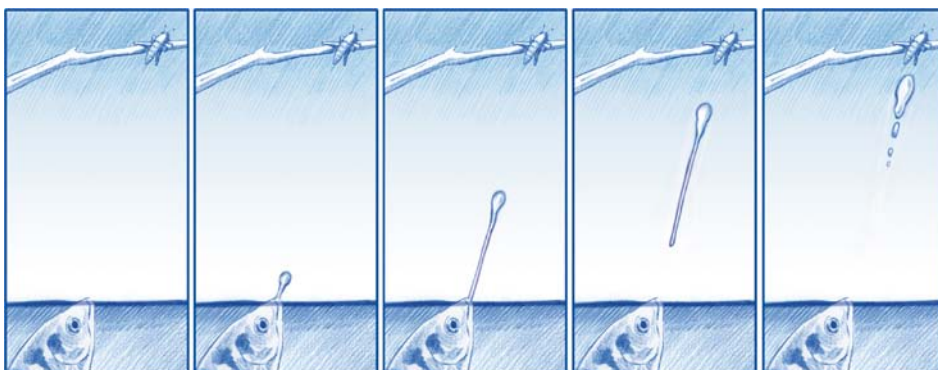
En supposant que le diamètre du jet émis par Toxote est de l'ordre de trois millimètres, on calcule que l'instabilité de Rayleigh-Plateau se développe en environ 20 millisecondes, tandis que les gouttes formées font environ six millimètres. Ces valeurs sont de l'ordre de grandeur des durées et tailles observées, mais elles leur sont inférieures et, selon le calcul, le jet devrait se fragmenter bien avant d'atteindre sa cible.

En examinant soigneusement les photos prises lors de la planque, on constate

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTJY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



LA VITESSE ET LE DÉBIT du jet d'eau est précisément modulé par le poisson-archer qui l'émet. Le jet devient plus fin et plus rapide qu'au début de l'émission, si bien que du liquide vient rattraper la tête du jet. Ainsi, le volume de liquide concentré dans la tête du jet et sa vitesse augmentent, d'où un impact puissant sur la proie. La modulation de l'émission a même pour effet d'éviter que le jet se fragmente en gouttelettes, ce qui nuirait à son efficacité.

BIBLIOGRAPHIE

P. Gerullis et S. Schuster, Archerfish actively control the hydrodynamics of their jets, *Current Biology*, vol. 24, pp. 2156-2160, 2014.

A. Vailati et al., How archer fish achieve a powerful impact : Hydrodynamic instability of a pulsed jet in *Toxotes jaculatrix*, *PLoS One*, vol. 7, e47867, 2012.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

bien que la queue du jet se fragmente et que les ondulations caractéristiques sont présentes dans la partie centrale du jet. Mais, et c'est encore une surprise, ces ondulations semblent contrôlées : plus la cible est distante, plus elles se développent tard.

Nos experts n'ont pas ménagé leurs efforts pour trouver des substances illicites au sein du crachat de Toxote, qui expliqueraient ces performances par des modifications de la tension superficielle ou de la viscosité. Las, rien n'y a fait : le liquide qui jaillit de la bouche du poisson-archer est de la banale eau.

Il faut se rendre à l'évidence, le poisson-archer module avec soin son émission dans la durée, de façon à éviter que le corps du jet se fragmente le long de la trajectoire sous l'effet de la tension superficielle, tandis

que cette dernière empêche que la tête du jet s'étale trop latéralement, afin de préserver la puissance de l'impact.

Nos experts ont donc poursuivi leurs études et observé la façon dont Toxote ouvre la bouche. Loin d'être un simple « j'ouvre la bouche, je la maintiens ouverte, je la ferme », la procédure est plus compliquée. Entrouverte avant l'éjection du liquide, la bouche s'ouvre puis se ferme progressivement avec la même amplitude (environ quatre millimètres), mais avec des durées qui varient selon la distance de la cible. Pour être complet, il faudrait étudier comment se contractent les branchies !

La conclusion est que, pour exercer un tel contrôle, le poisson-archer doit avoir un système neuronal performant, propice à d'autres capacités cognitives... Où donc Toxote s'arrêtera-t-il ?

APPEL À PROJETS INTERNATIONAL CONNECTALENT.ORG

NUMÉRIQUE
SANTÉ
VÉGÉTAL
ALIMENTATION
MATÉRIAUX
EMR
GÉNIE CIVIL
SCIENCES HUMAINES
ET SOCIALES
...

DÉPOSEZ VOS PROJETS SUR CONNECTALENT.ORG

Vous avez un projet porteur et souhaitez participer au rayonnement d'un territoire de savoir et d'innovation ? Rejoignez les Pays de la Loire. Partenariats originaux, stratégies de recherche d'excellence, investissements de rupture, programmes de formation à forte valeur ajoutée, les défis de demain n'attendent que vous.

CONNECTALENT.ORG

l'esprit grand ouvert



QUESTION AUX EXPERTS

Les enfants surdoués sont-ils plus anxieux ?

Selon la plupart des études, les enfants intellectuellement précoces ne sont pas plus anxieux que les autres, voire le sont moins.

Nicolas GAUVRIT



Les enfants surdoués comprennent plus vite que les autres. Bien avant les autres, ils sont capables de percevoir l'injustice dans le monde, la fatalité, la mort inéluctable. Rien de surprenant alors à ce qu'ils deviennent anxieux. Surtout qu'ils ne sont pas forcément en avance sur le plan émotionnel, et qu'ils sont donc souvent incapables de se prémunir des effets de cette compréhension accrue du monde. »

Voilà, en gros, ce qu'on peut lire et entendre un peu partout. Cela semble crédible, mais est-ce vérifié ?

Selon la définition la plus courante, les enfants surdoués sont ceux dont le quotient intellectuel (QI) dépasse 130. Notons qu'on parle plutôt aujourd'hui d'enfants intellectuellement précoces ; mais cette terminologie est trompeuse, car ils gardent souvent un QI élevé toute leur vie. L'idée qu'ils sont plus anxieux est très répandue, comme le confirme un petit sondage informel que j'ai mené sur Facebook. À la question « Pensez-vous que, en général, les enfants surdoués sont plus, autant ou moins anxieux que les autres ? », 83 personnes ont répondu « plus anxieux » et trois « aussi anxieux ». Personne n'a choisi « moins anxieux ».

Nombre de grands spécialistes, psychiatres ou psychologues, adhèrent aussi à cette idée. Cependant, leurs échantillons sont souvent biaisés : les enfants surdoués qui n'ont aucun problème ne vont pas les consulter. Ces spécialistes, qui voient surtout

des enfants précoces anxieux, pourraient donc être naturellement amenés à penser que les deux caractères sont liés.

Des études contrôlées, publiées dans des revues scientifiques à comité de lecture, sont nécessaires pour trancher. De telles études sont rares sur le sujet : j'en ai compté exactement 13. Seules deux d'entre elles accréditent – très partiellement – l'idée que les enfants surdoués sont prédisposés à l'anxiété.

Des résultats variables, mais qui remettent en cause l'idée reçue

La première, réalisée par la psychologue canadienne Patricia Forsyth en 1987, compare 41 enfants intellectuellement précoces (d'âges non précisés) à 93 enfants ordinaires. Elle trouve une anxiété accrue uniquement chez les filles surdouées, et non chez les garçons. La seconde, publiée en 2011 par les chercheurs américains Gregory Harisson et James Van Haneghan, considère 216 enfants âgés de 6 à 12 ans, dont 73 surdoués. Elle conclut que ces derniers ne sont pas plus anxieux, sauf dans un cas bien particulier, que les auteurs nomment la peur de l'inconnu et qui correspond à une sorte d'anxiété métaphysique face à la finitude de la vie, à l'Univers infini et aux limites de nos connaissances.

Parmi les 11 études restantes, cinq ne trouvent aucun lien significatif entre l'anxiété

et la précocité intellectuelle. Les six autres concluent que les enfants surdoués sont en moyenne moins anxieux. Et elles comprennent les trois études qui ont les plus gros échantillons (802, 974 et 5 507 participants).

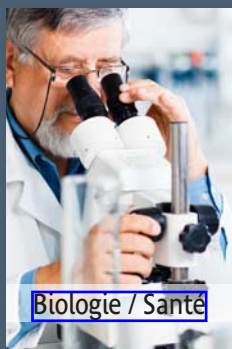
Ces résultats dépendent-ils d'effets culturels ? On ne peut l'exclure totalement : aux États-Unis et en Israël, où une majorité de ces travaux ont été menés, les surdoués sont sans doute mieux perçus que dans l'Hexagone, ce qui pourrait réduire leur anxiété. Néanmoins, deux des 13 études sont françaises et aucune ne trouve de lien significatif entre anxiété et précocité intellectuelle ; publiées en 2012 et 2013, elles ont été respectivement coordonnées par Jacques-Henri Guignard, du Centre hospitalier Guillaume Régnier, à Rennes, et par Fabian Guénolé, du CHU de Caen. D'autres travaux ont été menés en Pologne ou en Lettonie, et ne montrent pas non plus de différence.

Ces résultats restent à confirmer, car les 13 études comportent des faiblesses (elles ne précisent par exemple pas toujours la définition des surdoués utilisée). Mais en tout cas, l'idée que les enfants surdoués sont plus anxieux n'a aucun fondement scientifique. Ils pourraient même, au contraire, être moins anxieux. ■

Nicolas GAUVRIT est maître de conférences en mathématiques à l'Université d'Artois et psychologue du développement.
Adapté de : www.scilogs.fr



Sciences de la Terre



Biologie / Santé

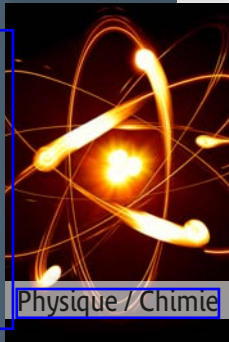


Paléontologie



Astrophysique

Toutes
les sciences
avec un
temps
d'avance !



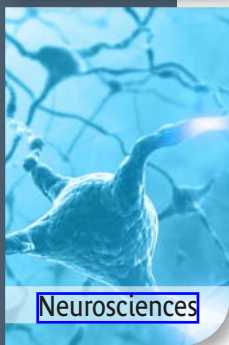
Physique / Chimie



Technologie



Mathématiques



Neurosciences

* Des numéros compris dans votre abonnement en cours uniquement.

POUR LA
SCIENCE

OFFRE **PASSION**

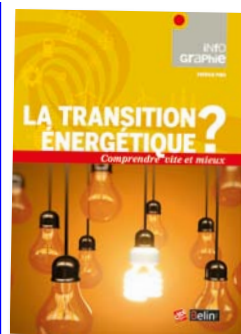


12 numéros + 4 hors-séries
+ les versions numériques OFFERTES* !

**4,33 € / mois
seulement !**

+ En cadeau
avec la durée libre :

La transition énergétique ?
Comprendre vite et mieux, de Patrick Piro
Données chiffrées et études à l'appui,
ce livre fait le point sur les différents défis
que pose la transition énergétique en ce début
de XXI^e siècle. Quelles sont les sources
d'énergie alternatives ? Peut-on consommer
moins d'énergie ou mieux ? Quelles évolutions
de nos modes de vie cela implique ?



Éditions Belin 2014 (valeur : 19 €)

BULLETIN D'OFFRE PASSION

À retourner accompagnée de votre règlement à : Service Abonnements Pour la Science • 8, rue Férou • 75278 Paris cedex 06

POUR LA
SCIENCE

1. MA FORMULE

☐ **OUI, je m'abonne à l'Offre Passion à 6,33 € par mois** ou 76 € pour 1 an. Je reçois le magazine *Pour la Science* (12 n°/an)
+ son thématique *Dossier Pour la Science* (4 n°/an) + mon livre offert. Je bénéficie des versions numériques offertes sur www.pourlascience.fr !

Mon e-mail obligatoire pour l'accès aux contenus numériques (à remplir en majuscules)

À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passez ce délai, merci d'en faire la demande à abonnements@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom : _____ Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

3. MON MODE DE REGLEMENT

☐ Je règle par prélèvement **6,33€ par mois** et reçois en cadeau le livre "Transition énergétique ?" (réf.00TRAN). Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC.

* Pour la France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger (pays de la zone SEPA) : 7,66 €/mois. Abonnement renouvelable tacitement à échéance et dénonçable à tout moment avec un préavis de 3 mois

AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT PAR MANDAT SEPA

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

POUR LA
SCIENCE

1 - COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____

2 - COORDONNÉES BANCAIRES

IBAN : _____
numéro d'identification internationale du compte bancaire - IBAN (International Bank Account Number)
BIC : _____
code international d'identification de votre banque - BIC (Bank Identifier Code) Type de paiement : Paiement récurrent/répétitif

3 - DATE ET SIGNATURE OBLIGATOIRES

A _____
Date : _____
Signature : _____

NOM DU CREANCIER : ICS N° FR92ZZZ426900
Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris
N° de référence unique de mandat (RUM) : _____

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

☐ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 76 €** sans bénéficier du cadeau.

* Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16€ - autres pays 35€

☐ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science* ☐ Par carte bancaire N° : _____
Date d'expiration : _____ Clé : _____

Signature obligatoire

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 ☐

PLS4508 0118374

SCIENCE & GASTRONOMIE

De l'ail noirci ou bleui

La cuisson prolongée de l'ail le noircit. Pourquoi ? Une analyse vient de déterminer les composés en jeu, mais la question n'est pas complètement résolue.

Hervé THIS



Dis-moi ce que tu manges, et je te dirai qui tu es. Aujourd'hui, on peut remonter la chaîne qui finit à l'être humain : dis-moi ce qu'il y a dans les supermarchés de ton pays, et je te dirai ce que tu manges. Les ingrédients culinaires populaires en France ? Carottes, pommes de terre, choux, tomates, salades pour les légumes ; bananes, oranges, ananas, pommes et poires pour les fruits. Pour les aromates : oignon, échalote et ail. Jadis, ce dernier n'était l'apanage que de la partie méridionale du pays, mais il s'est imposé au point que la cuisine française en met partout, au même titre que le laurier, le thym et le persil.

Frais, il s'impose par son odeur durable. Cuit, les composés soufrés qui lui donnent sa force sont progressivement modifiés, au point que des gousses d'ail bouillies dans cinq eaux successives font une purée d'une douceur suave, acceptable même par les plus rétifs.

Cette longue cuisson a des effets analogues quand l'ail est placé dans un braisé, ou, pratique moins courante en France, quand il est chauffé à des températures comprises entre 70 et 80 °C, dans des conditions d'humidité contrôlées, auquel cas l'ail noircit et prend un goût fruité.

Pourquoi ces changements de couleur et de goût ? Tingfu Liang, de l'Université de Tokyo, et ses collègues l'ont cherché par des analyses de spectrométrie de résonance magnétique nucléaire. Ils ont comparé de l'ail cru, de l'ail noirci après cinq jours de traitement, de l'ail noirci

après 25 jours, de l'ail à 90 jours (celui qui est vendu au Japon). Trente-huit composés ont été identifiés, dont 29 étaient présents dans l'ail cru (deux d'entre eux, l'uridine et l'acide lactique, n'avaient pas été décrits). Quatre de ces composés (GABA, tryptophane, éthanol et acide fumarique) disparaissaient lors des traitements. Huit autres apparaissaient, au contraire : l'acide pyroglutamique, la cycloalliline, l'acide formique, l'acide acétique, l'acide succinique, l'acide 3-hydroxypropionique, la glucosamine, le 5-hydroxyméthylfurfural et l'acide 5-hydroxyméthyl-2-furoïque.

Comment expliquer les nombreuses variations de compositions (augmentation initiale des sucres, puis diminution ; acidité croissante ; disparition des acides aminés ; disparition de l'éthanol, mais apparition de méthanol) ? De même que la cuisine ne jure que par l'ail et l'oignon, les chimistes de l'aliment se débarrassent des questions relatives au brunissement des aliments en invoquant les réactions de Maillard, découvertes en 1912 par le chimiste nancéen éponyme.

Toutefois c'est aller trop vite en besogne. Les réactions de Maillard, qui nécessitent des sucres et des acides aminés, engendrent des composés qui se forment également par d'autres réactions. Par exemple, le 5-hydroxyméthylfurfural apparaît dans de très nombreuses réactions où l'on chauffe des composés organiques : c'est le cas lors de caramélisations (des dégradations des sucres chauffés), ou lors de la « déshydratation » du fructose, une

réaction qui, contrairement à ce que son nom laisse penser, a lieu dans l'eau. Autrement dit, si les variations de composition de l'ail en cours de noircissement sont maintenant connues, il reste un travail considérable pour comprendre les transformations, composé par composé.

Il y a une autre question difficile sur l'ail : la cause de son bleuissement occasionnel. Là, je suis au regret d'annoncer à mes amis que les protocoles, pourtant publiés dans des revues scientifiques sérieuses, n'ont pas donné les résultats annoncés. En effet, il est dit que l'ail bleuit quand il est placé dans du vinaigre, à condition qu'il soit un peu ancien, mais des essais n'ont produit, au mieux, qu'un très léger bleuissement ou verdissement. Les variétés sont-elles en cause ? Des composés présents dans le vinaigre de riz, utilisé par les populations qui produisent – dit-on – cet ail ? À ce jour, ma cuisine et mon laboratoire abritent des bocaux où des gousses d'ail sont dans du vinaigre, mais le bleu ne point guère. Saurez-vous l'obtenir ? ■



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

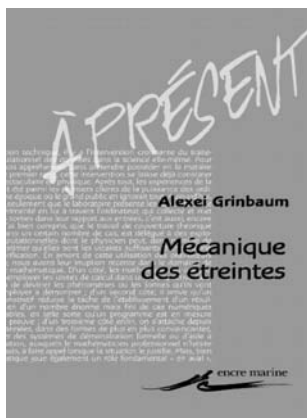
■ PHYSIQUE-PHILOSOPHIE

Mécanique des étreintes

Alexei Grinbaum

Encre Marine, 2014
[168 pages, 15 euros].

Formé à Saint-Petersbourg et à l'École polytechnique, l'auteur est un jeune physicien-philosophe très actif dans la recherche philosophique sur les fondements de la physique. Sa thèse sur la signification du concept d'information en théorie quantique est une importante contribution à ce qu'il nomme le tournant informationnel de l'interprétation de la physique quantique. Plus que d'un ouvrage didactique, il s'agit surtout d'un témoignage : à l'aide d'analogies et de métaphores empruntées à la société contemporaine, à la théo-



logie chrétienne ou à la mythologie et la philosophie grecques, il parvient à nous faire partager ce qu'il ressent, ou ce qu'il imagine qu'a ressenti Schrödinger au cours de la méditation à l'origine du concept d'intrication quantique.

Depuis que, dans un célèbre article de 1935, Einstein, Podolsky et Rosen ont montré la bizarrerie de ce concept, puis que des expériences ont prouvé la justesse des prédictions de la théorie quantique, il est apparu nécessaire

d'approfondir la réflexion sur les fondements de l'intrication quantique. Et c'est au cours de cette réflexion que s'est opéré le tournant informationnel évoqué.

Ce tournant implique la remise en cause de la théorie classique de l'information (due à Shannon), censée, en physique classique (c'est-à-dire non quantique!), fonder la mécanique et la thermodynamique statistiques, mais qui se révèle insuffisante face aux problèmes posés par l'intrication quantique. La recherche d'une théorie quantique de l'information capable de relever ces défis, outre les immenses enjeux technologiques qu'elle comporte, tel le développement d'ordinateurs quantiques, soulève des interrogations philosophiques séculaires et fondamentales. Comme l'explique Alexei Grinbaum, la principale est sans doute celle qui concerne la composition de deux entités quantiques en une seule.

Physicien théoricien des particules, presque aveuglément confiant dans l'efficacité de la théorie quantique des champs (une théorie quantique s'il en est!), j'ai eu tendance, comme nombre de mes collègues, à sous-estimer l'importance de ces interrogations. La lecture de cet ouvrage m'a poussé à leur donner dans ma réflexion la place qu'elles méritent.

Gilles Cohen-Tannoudji

Chercheur émérite au CEA, Paris

■ HISTOIRE DES SCIENCES

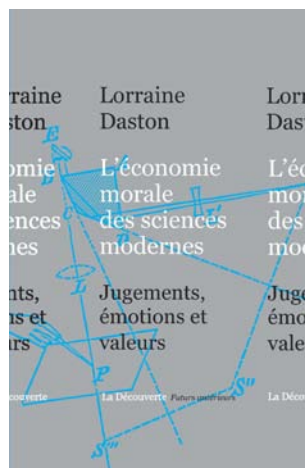
L'économie morale des sciences modernes

Lorraine Daston

La Découverte, 2014
[164 pages, 14,5 euros].

L'éditeur de ce livre consacre une collection, nommée *Figurs antérieures*, à traduire et

à commenter des auteurs étrangers ayant marqué les sciences humaines. Ici, un article de l'historienne américaine des sciences Lorraine Daston (actuellement



directrice de l'Institut Max Planck d'histoire des sciences, à Berlin), est l'objet du troisième essai de cette collection.

D'une grande rigueur scientifique, l'article est destiné à un public de pairs : heureusement, l'historien de la philosophie Stéphane Van Damme, qui le commente, nous en donne des clefs. Qu'est donc ce concept d'économie morale, que l'on s'attendrait assez peu à voir appliqué à la science ? Lorraine Daston exhibe les valeurs et les affects qui sous-tendent la construction des savoirs. Globalement, elle décrit les trois principaux champs de l'économie morale qui se recoupent partiellement : la quantification, l'empirisme et l'objectivité.

La quantification est l'impératif (moral!) de réduire, depuis Galilée et son programme de mathématisation, les résultats autant que possible à des nombres et formules, socle commun de communication et de compréhension, préférable car moins contestable que les phrases, trop souvent composées de « mots comparatifs et super-

latifs » (W. Petty, 1690). L'empirisme est fondé, entre autres, sur le témoignage (scientifique) et sur la valeur (morale) de la confiance entre pairs, voire entre savants et gentilshommes, du XVII^e siècle à nos jours. La crédibilité du témoin et de l'événement relaté a dès le début été un problème majeur dans la science moderne – sachant qu'il était (il est toujours ?) « aussi facile de se tromper par crédulité excessive que par scepticisme excessif ». Enfin, troisième champ moral, celui de l'objectivité : Lorraine Daston montre comment se mettent en place les valeurs fondatrices d'un travail collectif, meilleur garant (moral) d'une objectivité que ne peut l'être la recherche isolée.

Cette grille de lecture de la science par son économie morale (économie au sens figuré de structure, d'ordre) se révèle féconde et, à l'inverse d'autres, difficilement contestable.

Alexandre Moatti

SPHERE, Université Paris-Diderot

■ ANTHROPOLOGIE

La tortue et la lyre

John Scheid et Jesper Svenbro

CNRS Éditions, 2014
[280 pages, 22 euros].

Autrefois, quand on voulait écrire un livre sur l'origine des mythes, on l'intitulait... *L'origine des mythes*. Aujourd'hui, il paraît préférable de le faire connaître sous une appellation du genre... *La tortue et la lyre*. Évidemment, seuls les rares initiés comprendront tout de suite de quoi il s'agit ; quant aux autres, désorientés, ils risquent de se tourner vers une autre lecture, et ce sera dommage car un texte écrit par John Scheid et Jesper Svenbro n'est pas à négliger !

Cet ouvrage aborde une problématique ardue et il est nécessaire

de simplifier pour le présenter aux lecteurs. Contrairement à leurs prédécesseurs, les auteurs pensent que le vocabulaire est aux origines du récit mythique. Prenons comme exemple la fondation de Carthage. Selon la tradition, la reine Élixa (ou Didon) est venue en Afrique de Phénicie et a demandé au roi Hiarbas de lui donner autant de terre que pouvait en couvrir une peau de vache (*bursa* en grec). Le roi accepte, sans deviner la ruse de l'étrangère qui découpa la peau en fines lanières et réussit à circonscrire un vaste territoire alors qu'il croyait qu'elle ne recouvrirait qu'un petit espace. Elle aurait alors donné à son nouveau domaine le nom de « peau de vache », Byrsa. Mais les auteurs proposent d'inverser : le site s'appelait Byrsa, et de là le récit explicatif. De nombreux autres mythes sont ainsi étudiés.

C'est à partir de la page 101 que le lecteur trouve l'explication du titre ésotérique donné au livre. La carapace de la tortue, pour les Anciens, était à la fois la maison et la tombe de cet animal. Elle pouvait également être employée pour fabriquer une lyre. Et la lyre, dans leurs récits, se faisait obéir même par les pierres.

Le livre présente deux centres d'intérêt : d'une part, le lecteur y

trouve des mythes enchanteurs et poétiques ; d'autre part, il y lit des explications de ces récits. Il sera convaincu, ou ne le sera pas, et cette incertitude même ajoutera au piment de l'enquête.

Yann Le Bohec
Professeur émérite à l'Université de Paris IV-Sorbonne

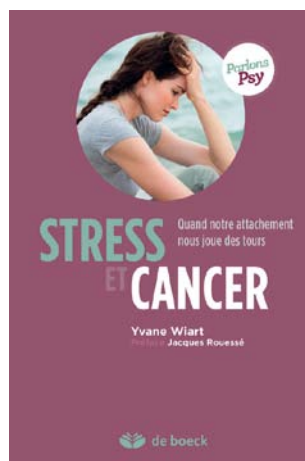
■ MÉDECINE

Stress et cancer

Yvane Wiart
De Boeck, 2014
(240 pages, 20 euros).

La relation entre stress et cancer n'est pas évidente de prime abord. Certes, de nombreuses publications ont traité du sujet, des écoles de pensée ont approfondi le concept et les pathologies psychosomatiques ont acquis une reconnaissance aujourd'hui incontestée. Mais réflexions, constats cliniques et théories, aussi construites soient-elles, ne font pas preuve. Tout le mérite d'Yvane Wiart, chercheuse associée au Laboratoire de psychologie clinique de l'Université Paris-Descartes, est de retracer les recherches et les rôles des personnalités qui, en Europe comme outre-Atlantique, ont rassemblé le faisceau d'arguments et de preuves faisant aujourd'hui autorité en la matière. La qualité de cet ouvrage, fruit d'un énorme travail de synthèse, est confirmée par l'éloge de son préfacier, Jacques Rouéssé, l'un des meilleurs spécialistes du cancer.

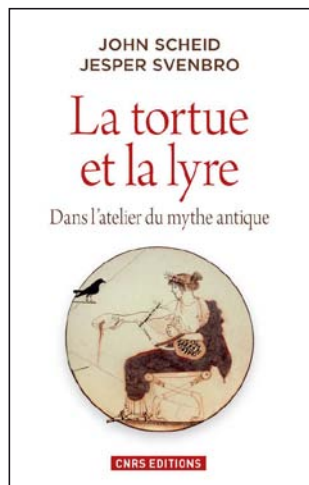
Définir le stress est difficile : hydre aux multiples composantes, le stress est constitutionnel à notre histoire individuelle et collective et



participe, en fonction de notre capacité à la résilience, à la construction de notre personnalité. Mais cette capacité à s'adapter, à faire face, dépend aussi de la manière dont la société s'en mêle et du soutien potentiel des autres. Chaque individu, confronté à sa propre histoire, est ainsi tributaire de multiples interférences sociales et culturelles qui le mettent à rude épreuve. Élaborée à partir de nombreux travaux, tant dans le domaine de la psychopathologie que de la psychanalyse, une typologie constituée de plusieurs profils bien différenciés est aujourd'hui largement admise. Parmi eux, certains semblent être davantage associés à l'émergence d'un cancer : un attachement perturbé au cours de la petite enfance, une dépression niée ou camouflée, la non-capacité de verbalisation (l'alexthymie), la répression des émotions.

L'auteurs'interroge en conclusion sur les raisons qui empêchent cette réalité de se diffuser dans le milieu médical et scientifique.

Bernard Schmitt
CERNh, Lorient



Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



Histoire de la théorie des oscillations non linéaires

Jean-Marc Ginoux
Hermann, 2014
(435 pages, 46 euros)

Saluons cet ouvrage sur l'histoire de l'un des pans essentiels des mathématiques appliquées. Il demande un peu de culture mathématique minimale, mais il est lisible dans tous ses aspects non calculatoires. On y découvrira comment l'étude systématique des équations différentielles régissant les circuits électriques oscillants (RLC) a conduit à la compréhension de modes oscillatoires – les oscillations de relaxation par exemple – qui foisonnent dans la nature, les battements du cœur, par exemple.



Quand le paranormal manipule la science

Serge Larivée
PUG, 2014
(246 pages, 15 euros)

La guerre aux pseudosciences a un remarquable soldat outre-Atlantique. Ce professeur à l'École de psychoéducation de l'Université de Montréal s'attaque en psychologue au problème de l'attrait des croyances douteuses. Il analyse notamment pourquoi un esprit humain préfère si souvent croire plutôt que douter, alors que la logique l'y inviterait. Stupéfait par l'essor « phénoménal » de la psychanalyse en France, il la pourfend allègrement, avant d'énoncer les 26 procédés utilisés par les défenseurs des pseudosciences.



L'aurochs
Claude Guintard et Olivier Néron de Surgy
Gerfaut, 2014
(127 pages, 29,50 euros)

Apparu il y a quelque 500 000 ans, l'aurochs – la vache sauvage – a disparu en... 1627. Le présent ouvrage, aussi clair que court et bien illustré, fait le tour de cette espèce disparue, mais aujourd'hui reconstituée à partir de bovins domestiques. Le rappel des caractéristiques de l'aurochs préhistorique et antique est suivi du récit des projets de sa reconstitution à partir des caractères sauvages toujours présents dans nos vaches. Une passionnante et curieuse tentative de « dédomestication ».

INCONNUS CÉLÈBRES

La logique refuse le cercle vicieux, la littérature en fait un mot d'esprit. Ainsi, certains auteurs, constatant qu'on parle d'eux plus qu'on ne les lit, reprennent à leur compte une formule attribuée à Heine : « Je suis connu pour ma notoriété. »

La logique ne saurait réaliser à la fois A et non-A, la littérature ne s'en prive pas. Voici trois exemples. Personne ne lit plus rien de Sully Prudhomme (à part peut-être *Le Vase brisé*), mais chacun sait qu'il fut le premier lauréat du prix Nobel de littérature. Grâce à quoi, cet auteur oublié est célèbre.

Second exemple. À Amboise, se trouve la maison natale du Philosophe inconnu (en fait, deux maisons se disputent cet honneur, mais une seule est authentique !). Ce Philosophe inconnu est parfaitement connu. Il s'appelait Louis-Claude de Saint-Martin (1743-1803). Pourtant, le surnom de Philosophe inconnu, qu'il eut dès son vivant, est justifié, car qui connaît Louis-Claude de Saint-Martin ?

Troisième exemple, le désir exprimé par un personnage de Herman Melville. « Voilà l'immortalité, la vraie : être perpétué dans ses œuvres et non pas dans son nom ! Ah ! Si je pouvais devenir anonymement célèbre ! » (*Mardi*, chap. CXLII, Pléiade, 1996, p. 1002).

En fait, il y a logique et logique. Dans le cadre de la logique formelle, les cas ci-dessus sont des paradoxes inextricables. Mais ce cadre n'est pas adapté. C'est celui de la logique mondaine qui l'est. Laquelle a ses règles propres, comme Proust l'a vite appris : « Quand le duc, pour me présenter, eut dit mon nom à M. de Bréauté, celui-ci, voyant que ce nom lui était absolument inconnu,

ne douta plus dès lors que, me trouvant là, je ne fusse quelque célébrité » (*Le Côté de Guermantes*, II, chap. II, Pléiade, 1954, tome II, p. 430).

FOI DE SINGE

La ligne de démarcation entre homme et animal s'estompe. Deux découvertes récentes renforcent cette tendance. Des conservateurs du Parc du Serengeti, en Tanzanie, ont mis en évidence des preuves de croyance en un Dieu unique chez des chimpanzés, et des traces de cultes fétichistes chez des bonobos.



Ces découvertes sont-elles une nouvelle démonstration de l'existence de Dieu ? Que disent-elles de la proximité des chimpanzés et des bonobos avec les hommes ? Polémiques passionnantes en perspective...

DRÔLE DE SCIENCE

Gare au faux sens : l'expression « humour scientifique » signifie « humour des scientifiques », non « humour des sciences ». Les sciences, en elles-mêmes, n'ont aucun humour. Pas plus que, disons, le commerce ou le sport. Mais les humains sont ainsi faits qu'ils trouvent matière à rire dans à peu près n'importe quel contexte – si ce n'est le commerce ou le sport, pourquoi pas les sciences ?

Le rire des scientifiques naît des mêmes effets qu'ailleurs. Certes, il est fréquent que la drôlerie n'apparaisse qu'à eux, mais cela ne signifie pas qu'elle relève d'un humour

spécial. Songeons aux jeux de mots. S'ils sont faits dans une langue que j'ignore, je ne pourrai pas m'en amuser. Pourtant, rire d'un jeu de mots n'a rien de propre aux gens qui parlent cette langue.

Voici quelques facéties appréciées des mathématiciens. Une bourde de débutant commise par un ponte (Grothendieck prenant 57 pour un nombre premier). Un résultat si compliqué que même celui qui l'a trouvé n'y comprend rien. Un résultat volontairement faux, reposant sur un traquenard bien dissimulé (Laurent Schwartz démontrant que toutes les droites du plan sont concourantes). L'utilisation loufoque d'une théorie dans un cadre où elle n'a aucun sens (appliquer des théorèmes mathématiques pour capturer un lion dans le désert).

La liste pourrait être étendue sans fin. Reste que jamais je n'ai rencontré d'humour spécifique aux sciences. Quiconque m'en donnera un exemple augmentera ma compétence scientifique, donc aura toute ma reconnaissance.

LE MONDE EST-IL PETIT ?

« Le monde est rétréci par notre expérience », disait Vigny. Depuis, on ne cesse d'inventer des termes frappants, tel celui de village planétaire, pour souligner combien les techniques modernes ont rapetissé le monde.

Et pourtant... Malgré l'utilisation intensive de ces techniques, la recherche de l'avion du vol MH370 Kuala Lumpur-Pékin, disparu le 8 mars 2014, est restée vaine à l'heure où j'écris. L'éventualité que l'avion gise, au fond d'un océan, en un endroit destiné à demeurer à jamais inconnu, est même envisageable.

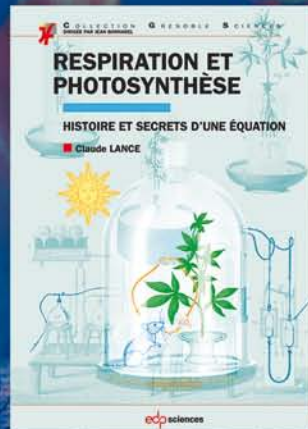
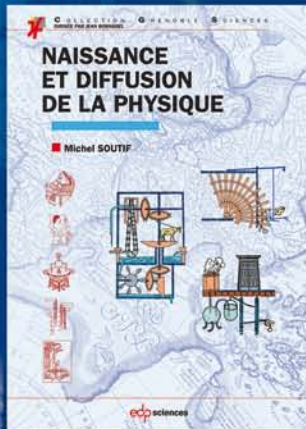
Ainsi, nous avons simultanément la perception d'un monde devenu petit, puisqu'il peut être parcouru en un rien de temps, et resté hors de portée, puisqu'un objet aussi gros qu'un avion de ligne peut s'y perdre. Comme souvent, le jamais vu des techniques (de plus en plus puissantes, rapides, précises, etc.) se déroule sur un fond de permanences. Les techniques changent tout, mais bien des vécus humains restent inchangés. ■



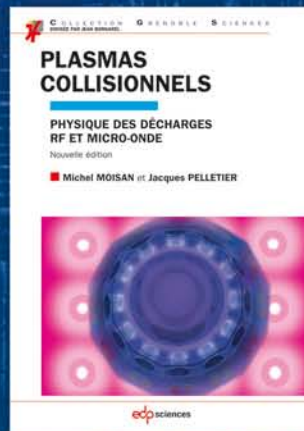
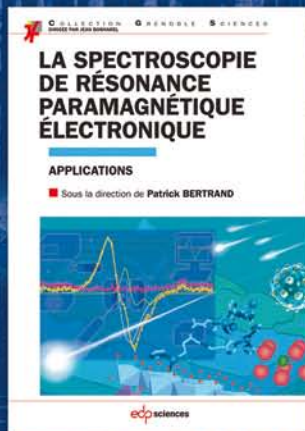
GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

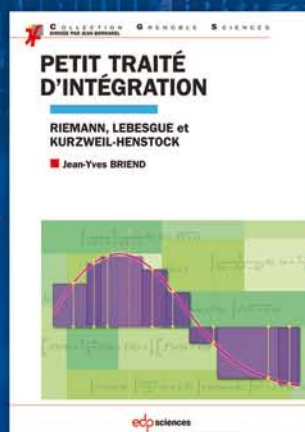
En 2014, Grenoble Sciences a labellisé
des ouvrages originaux pour des publics variés.



■ 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

Rhône-Alpes
Région

Notre métier facilite le vôtre

