

POUR LA SCIENCE

Mai 2015 - n° 451

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Réchauffement
climatique

Le goût
des vins
va-t-il
changer ?

M 02687 - 451 - 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

3 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaa
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe, assisté de Adrian Bonte
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Ingrid Leroy
Correction et assistance administrative : Maud Bruguière
Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet
Direction financière et direction du personnel : Marc Laume
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 : Serge Berthier, Évelyne Host-Platret, Stefan Klotz, Eric Lagadeç, Nicolas Martin, Marie Perez, Christophe Pichon, Richard Taillet

PUBLICITE France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
jfguillotin@pourlascience.fr
Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Sinette 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 chalets, 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 traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).



www.ojd.com



Maurice Mashaa
rédacteur en chef

Aléas viticoles

Depuis plusieurs décennies, la température moyenne à la surface du globe augmente. Selon les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre envisagés, les scientifiques prévoient que la hausse de la température terrestre moyenne d'ici 2100 sera comprise entre 2 et 4 °C environ.

L'impact du réchauffement climatique se fait déjà sentir sur la vigne et la flore, avec la montée vers le Nord de certaines espèces méridionales. Il se fait aussi sentir sur l'agriculture, et notamment la viticulture (voir pages 26-35). Depuis les années 1960, les dates des vendanges en France ont avancé vers l'été de trois semaines en moyenne. Les caractéristiques des vins, qui dépendent des conditions climatiques dans lesquelles le raisin a mûri, se modifient. Certains vignobles en pâtissent, d'autres en tirent avantage, comme ceux de

Depuis les années 1960, les vendanges ont en moyenne avancé de trois semaines.

Bourgogne – pour l'instant. Mais avec le réchauffement à venir, comment évolueront les choses ? Un bordeaux de 2050 sera-t-il similaire à un bordeaux de 2010 ? Fera-t-on du vin aux Pays-Bas, en Suède ?

Le savoir-faire des vignerons leur permet de s'adapter à bien des aléas et de continuer à produire des vins de qualité. Face à un réchauffement de 2 °C, ils pourront cultiver des variétés un peu différentes, modifier certaines pratiques culturales et procédures de vinification, voire déplacer leurs parcelles. En cela, les chercheurs, tels ceux de l'Inra en France, leur seront d'une aide précieuse.

Toutefois, avec un réchauffement de 4 °C, les changements seront plus drastiques et le monde viticole risque d'être bouleversé. Éviter ces 4 °C est justement l'un des grands enjeux de la conférence COP 21 sur le climat, qui se tiendra à Paris à la fin de cette année. Les risques qu'encourt la filière du vin pèseront-ils dans les négociations sur les émissions de gaz à effet de serre ?

Actualités

- 5 Galaxies naines : le tableau de chasse s'étoffe
- 7 Des ultrasons contre Alzheimer ?
- 8 Une toxine bactérienne bientôt convertie en antibiotique ?
- 13 Le prix Abel 2015



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 Point de vue
Loi sur la biodiversité : les scientifiques au pied du mur
Denis Couvet et Anne Teyssèdre
- 16 Entretien
« L'innovation thérapeutique est en panne »
Bernard Meunier
- 20 Lu sur SciLogs.fr
Les vestiges du Proche-Orient antique en péril
Cécile Michel
- 22 **Homo sapiens informaticus**
Débattre ou argumenter
Gilles Dowek
- 24 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Plus humains grâce aux robots
Gérald Bronner

Le numéro comporte deux offres d'abonnement
Pour la Science en p. 19 et 75.
En couverture : © sumkinn/shutterstock.com ; Pour la Science
L'abus d'alcool est dangereux pour la santé,
consommez avec modération.

À LA UNE

26

AGRONOMIE

Réchauffement climatique : la carte des vins redessinée ?

Kimberly Nicholas

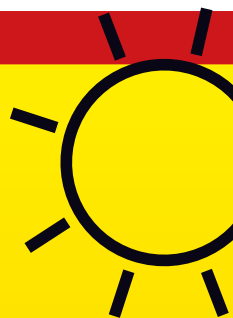
Le changement climatique modifie les caractères des vins produits dans les terroirs. En Californie et ailleurs, les producteurs de vins sont déjà confrontés à la nécessité d'adapter leurs vignobles et leurs pratiques.

34

« Avec 4 °C de plus, la carte du vignoble français explose ! »

Entretien avec Jean-Marc Touzard

Quel est l'impact du réchauffement climatique sur le vignoble français, et comment ce dernier s'adapte-t-il ?



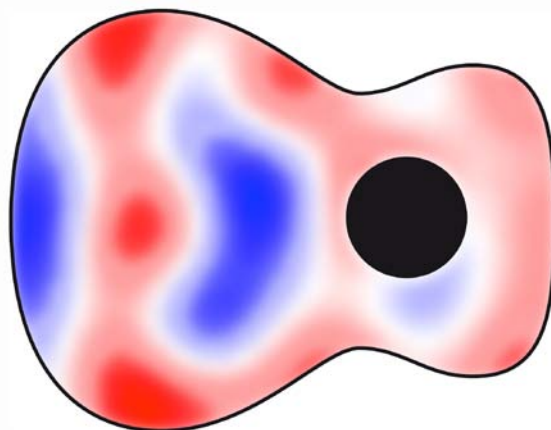
36

PHYSIQUE

L'holographie acoustique, un nouvel outil pour les luthiers

N. Bertin, L. Daudet, R. Gribonval et F. Ollivier

Lorsqu'il fabrique un instrument, le luthier le peaufine en écoutant les sons que ses vibrations produisent. Une nouvelle technique d'analyse et de visualisation des vibrations lui faciliterait la tâche.



46

PORTFOLIO

Feuilles virtuelles au quai Branly

Cécile Lestienne

Entre scanner et imprimante 3D, le musée du quai Branly, à Paris, présente jusqu'au 17 mai les « entrailles » secrètes d'une dizaine de ses chefs-d'œuvre. Du jamais vu



54

PHYSIQUE

Est-il possible d'exploiter un trou noir ?

Adam Brown

L'environnement immédiat d'un trou noir contient une importante quantité d'énergie. Mais pour en extraire, une civilisation future devra construire un ascenseur spatial qui défie les lois de la physique.

60

ÉTHOLOGIE

Intelligence : les babouins passent le test

Joël Fagot et Anaïs Maugard

Experts en analogies, capables de reconnaître leur ignorance, moins aptes à réfléchir quand ils sont stressés... Tel est le portrait des babouins que dressent des études d'un genre nouveau, où des tests cognitifs en libre accès sont mis à disposition des singes.

68

HISTOIRE DE L'ASTRONOMIE

Neptune : l'erreur de Le Verrier

Jacques Gappaillard

En 1846, sur les indications d'Urbain Le Verrier, on découvre la planète Neptune. Pour l'astronome français, c'est la gloire. Ses contemporains et successeurs saluent sa performance et en oublient de vérifier la précision qu'il annonce...

Rendez-vous

78

Logique & calcul

Le défi de la sixième couronne

Jean-Paul Delahaye

Une figure plane peut-elle paver une grande surface sans qu'il lui soit possible de paver le plan tout entier ? Ce problème dit de Heesch est posé depuis 1968.

84

Science & fiction

Quand les morts sortent de terre

Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86

Art & science

Le laboureur des champs... magnétiques

Loïc Mangin



88

Idées de physique

Ces boîtes qui crient « Au feu ! »

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

93

Question aux experts

Pourquoi a-t-on des courbatures ?

Stephen Roth

94

Science & gastronomie

L'auto-organisation des mets

Hervé This

96

À lire

98

Blog-notes

Les chroniques de Didier Nordon

Aussi en numérique !

SCIENCE.fr

Archives
depuis 1998

Application

sur iPhone et Android



LES ÉDITIONS SCIENCE.fr

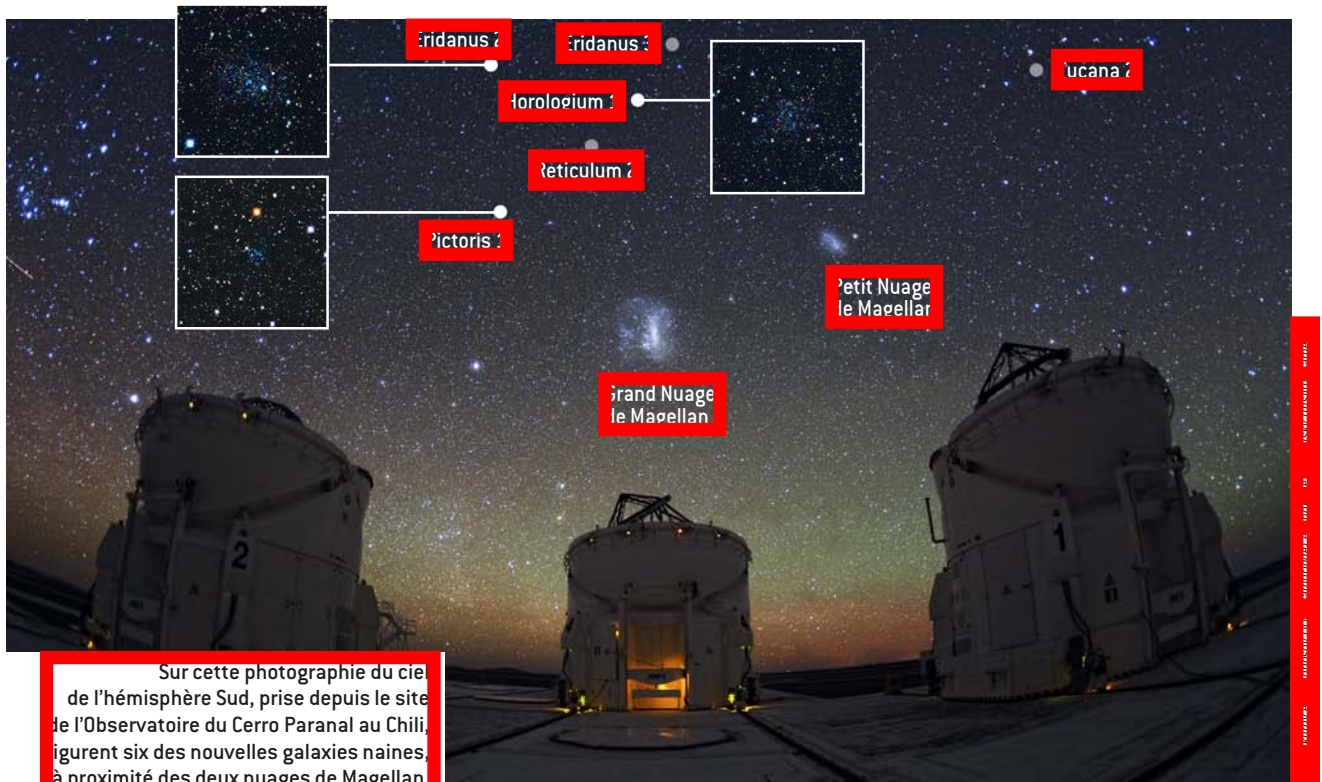


Actualités

Astrophysique

Galaxies naines : le tableau de chasse s'étoffe

Onze nouvelles galaxies naines en orbite autour de la Voie lactée ont été découvertes. Des observations qui, si elles se multiplient, réjouiront les partisans de la matière noire



Sur cette photographie du ciel de l'hémisphère Sud, prise depuis le site de l'Observatoire du Cerro Paranal au Chili, figurent six des nouvelles galaxies naines, à proximité des deux nuages de Magellan.

L'hypothèse de la matière noire, substance de nature inconnue qui représenterait 25% du contenu de l'Univers, explique un nombre d'observations astronomiques et cosmologiques. Mais l'un de ses talons d'Achille est sans doute le problème des galaxies naines. D'après les modèles de formation des galaxies spirales, les astrophysiciens estiment que, compte tenu de la matière noire, la Voie lactée devrait être accompagnée de plusieurs centaines de galaxies naines (contenant chacune quelques dizaines de milliers à quelques millions d'étoiles). Or seuls une vingtaine de ces objets sont connus, notamment grâce aux observations du projet Sloan Digital Sky Survey. L'explication

avancée est que les galaxies naines sont très peu lumineuses (jusqu'à un milliard de fois moins que la Voie lactée), ce qui les rend difficiles à repérer. Ce catalogue restreint des galaxies naines vient toutefois de s'enrichir de 11 nouvelles venues, révélées par une récente génération de programmes d'observation.

Des chercheurs de l'Université de Cambridge ont repéré neuf nouvelles galaxies naines dans les données publiques de la première année d'observations du programme DES (Dark Energy Survey). De leur côté, les membres de DES sont parvenus au même résultat, de façon indépendante.

Le Dark Energy Survey vise à étudier la dynamique d'expansion

de l'Univers et en particulier l'influence de l'énergie sombre. Pour ce faire, la caméra Dark Energy Camera (DECam), dotée d'une résolution de 570 millions de pixels et montée sur un télescope de quatre mètres au Chili, cartographie les galaxies jusqu'à une distance de huit milliards d'années-lumière.

Les chercheurs utilisent ces données pour caractériser l'énergie sombre en analysant des effets de lentille gravitationnelle, la distribution statistique des galaxies ou les supernovae de type Ia. Cependant, les images de haute définition de la caméra DECam permettent aussi de rechercher des galaxies naines qui se trouveraient dans son champ.

Nicolas Martin, de l'Observatoire astronomique de Strasbourg, et ses collègues du projet SMASH (Survey of the MAGellanic Stellar History) ont eux aussi utilisé les observations de la caméra DECam et ont découvert une galaxie naine supplémentaire. Le chercheur strasbourgeois participe aussi au programme Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System) qui utilise un observatoire situé à Hawaï, lequel a également annoncé l'observation d'une autre galaxie naine.

Ce sont donc 11 potentielles galaxies naines qui ont été découvertes. Le problème du manque de galaxies naines satellites de la Voie lactée est loin d'être résolu ;

mais ces observations renforcent les scénarios de formation des galaxies fondés sur la matière noire et l'idée que les galaxies naines manquent à l'appel tout simplement parce qu'elles sont difficiles à observer. Les capacités des programmes DES, MASH et Pan-STARRS laissent penser que nombre d'entre elles restent à découvrir.

Les galaxies naines présentent un autre intérêt pour la recherche de la matière noire. Les modèles les plus courants prévoient que les régions les plus denses en cette substance émettent un rayonnement gamma, lié à l'annihilation de particules de matière noire. Ainsi, le centre galactique, qui devrait en contenir beaucoup, serait une source importante de rayons gamma. Mais de nombreux objets astrophysiques (trous noirs, étoiles à neutrons, etc.) contribuent à un bruit de fond gamma dont il est difficile d'extraire l'éventuel signal dû à l'annihilation de matière noire. Les chercheurs se tournent donc vers les galaxies naines, dont la composition en matière noire atteindrait dans certains cas 99% ! Un rayonnement gamma émis par ces galaxies naines, très pauvres en étoiles et donc en sources de rayons gamma perturbatrices, pourrait trahir la présence de matière noire. Malheureusement, aucun signal gamma assez fort n'a été observé dans les galaxies naines connues.

Qu'en est-il de celles qui viennent d'être découvertes ? À ce stade, la seule qui présente une émission de rayons gamma potentiellement intéressante est Reticulum 2. Mais il est trop tôt pour dire s'il s'agit de matière noire...

Sean Bailly

S. E. Koposov et al., <http://arxiv.org/abs/1503.02079>, 2015 ; N. F. Martin et al., <http://arxiv.org/abs/1503.06216>, 2015

Médecine

Des ultrasons contre Alzheimer ?

Dans un modèle de la maladie d'Alzheimer chez la souris, des ultrasons éliminent les plaques accumulées dans le cerveau et restaurent la mémoire. Charles Duyckaerts, neuropathologiste à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière, commente ces travaux de Gerhard Leinenga et Jürgen Götz, de l'Université du Queensland en Australie.

En quoi consistent ces travaux ?

Charles Duyckaerts : Un problème auquel les pharmacologues sont souvent confrontés est la barrière hémato-encéphalique : la paroi des vaisseaux sanguins cérébraux empêche non seulement les agents pathogènes, mais aussi nombre de médicaments, d'atteindre le cerveau. En faisant agir des ultrasons sur le cerveau de leurs souris modèles, les chercheurs ont ouvert transitoirement la barrière. Ils ont alors observé une diminution des agrégats du peptide bêta-amyloïde – les plaques caractéristiques de la maladie. Les souris avaient une meilleure mémoire que leurs congénères non traitées

Pourquoi utiliser les ultrasons ?

Ch. D. : C'est un moyen trouvé il y a assez longtemps (2001) pour ouvrir la barrière de façon transitoire, et testé chez l'animal. L'équipe de Marc Dhenain, au CEA, et d'autres chercheurs ont amélioré la technique en la couplant à l'injection dans le sang de microbulles, qui permettent de limiter la puissance d'ultrasons requise. Elles ouvriraient la barrière en vibrant sous les ultrasons.

Comment l'ouverture de la barrière entraîne-t-elle la destruction des plaques ?

Ch. D. : Les chercheurs ont observé que les sentinelles du cerveau – les cellules microgliales, des cellules

immunitaires – s'activent et phagocytent alors le peptide bêta-amyloïde. Un activateur a pu passer la barrière lors de son ouverture, telle une molécule non spécifique du peptide – l'albumine, par exemple. C'est ce que proposent les chercheurs, qui l'ont détectée dans le cerveau des souris après les ultrasons.

Comment une molécule non spécifique peut-elle inciter les sentinelles à détruire les plaques amyloïdes ?

Ch. D. : En arrivant dans le cerveau, l'albumine a pu entraîner une activation microgliale. Un mécanisme



Charles Duyckaerts,
CM, AP-HP, Univ. Paris-VI

similaire se produit dans les accidents vasculaires cérébraux. Un infarctus cérébral provoque une nécrose tissulaire qui recrute les cellules microgliales. S'il touche un patient atteint d'une maladie d'Alzheimer, ces sentinelles absorbent les peptides bêta-amyloïdes alors qu'elles ne le faisaient pas avant. En fait, les cellules microgliales sont toujours au centre des mécanismes d'élimination du peptide, même si l'on

ne comprend pas pourquoi elles ne le détruisent pas spontanément...

Les stratégies actuelles visent donc à activer les cellules microgliales ?

Ch. D. : Dans l'ensemble, oui, car elles se fondent sur l'hypothèse de la cascade amyloïde : initialement, il y aurait accumulation du peptide, ce qui provoquerait l'apparition de dégénérescences neurofibrillaires, l'agrégation d'une protéine devenue anormale, tau, dans les neurones). La recherche d'un vaccin repose sur cette idée. Jusqu'à présent, les résultats sont négatifs. Peut-être parce que la maladie était prise trop tard. Aussi les résultats d'études telles que A4 et Dian, qui testent l'effet d'anticorps administrés à un stade précoce, sont très attendus. Cependant, l'interaction de tau et du peptide bêta-amyloïde est indispensable pour produire les symptômes. Un point majeur est de comprendre cette synergie.

Les ultrasons sont-ils une piste prometteuse ?

Ch. D. : Intéressante, mais il reste de nombreuses étapes à franchir ! La technique est-elle inoffensive ? Quels sont les effets à long terme de l'activation des sentinelles ? L'expérimentation animale devra répondre à ces questions avant toute application à l'homme.

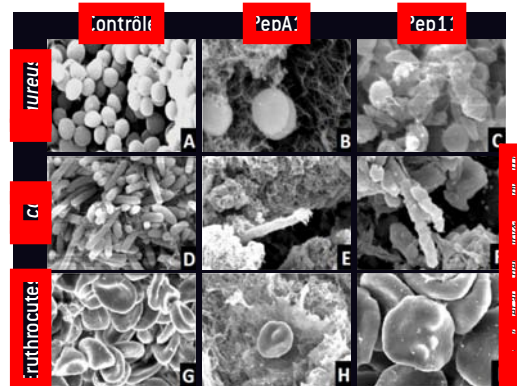
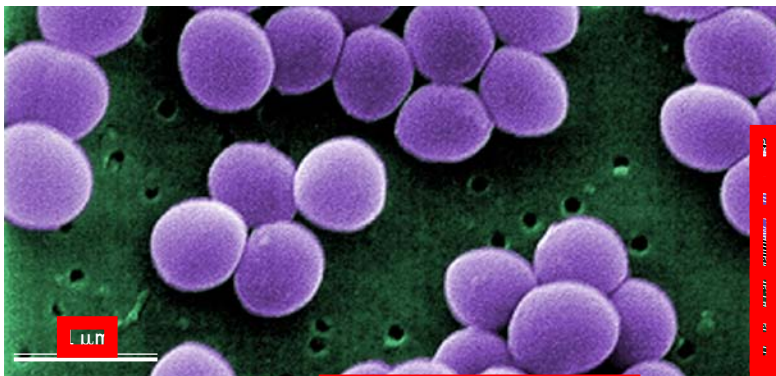
Marie-Nicole Cordonnier

G. Leinenga et al., *Sci. Transl. Med.*, 11 mars 2015

Médecine

Une toxine bactérienne bientôt convertie en antibiotique ?

En modifiant la forme et la structure d'une toxine bactérienne, des biochimistes l'ont transformée en une arme efficace contre nombre de bactéries.



Les bactéries *S. aureus* [a], produisent une toxine, PepA1. Cette toxine tue les bactéries *S. aureus* [b, B] et *E. coli* [E], mais aussi les cellules sanguines humaines [H]. Sa version modifiée Pep11, en revanche, détruit les bactéries [C, F], mais pas les cellules humaines [I].

Retourner l'arme d'une bactérie contre elle-même et ses cousines, c'est ce que propose l'équipe de Brice Felden du laboratoire de Biochimie pharmacétique (U835 Inserm), à l'Université de Rennes. Comme nombre de bactéries, le staphylocoque doré (*Staphylococcus aureus*), pathogène pour l'homme, présente un système de suicide autoprogrammé : lors d'un stress (oxydation, acidification), il produit une toxine, un petit peptide en forme d'hélice nommé PepA1, qui se fixe sur la membrane bactérienne, ce qui entraîne sa destruction et la mort de la bactérie.

Toutefois, cette toxine attaque aussi les membranes des cellules de l'hôte infecté. Comment, alors, la transformer en une arme spécifiquement dirigée contre les bactéries ? Comment la modifier pour qu'elle devienne inoffensive pour les cellules de l'organisme ?

Les biochimistes sont partis d'une analogie : depuis quelques années, une classe de petites molécules – les peptides antimicrobiens – intéresse les pharmacologues. Produits par de nombreux organismes (bactéries, plantes, animaux), ces peptides participent à leur défense contre les microbes. Petits, de charge positive, ils interagissent facilement avec les membranes

bactériennes, de charge négative, et constituent donc un réservoir potentiel de molécules thérapeutiques, notamment d'antibiotiques. À l'état naturel, cependant, ces peptides linéaires sont détruits par les enzymes de l'organisme. En revanche, lorsqu'on les modifie en leur donnant une forme cyclique et en leur insérant des analogues d'acides aminés, ils deviennent plus stables et ont même une meilleure activité, ce qui en fait de bons candidats pour de futurs antibiotiques.

Brice Felden et ses collègues se sont inspirés de cette idée : ils ont synthétisé une série de peptides cycliques dérivés de la toxine PepA1 et ont étudié leur effet sur deux espèces bactériennes, *S. aureus* et *Escherichia coli*, ainsi que sur des cellules sanguines humaines, afin de mesurer leur toxicité.

Pour optimiser ces peptides vis-à-vis de leur double objectif (une destruction efficace des bactéries tout en préservant les cellules de l'organisme), ils ont aussi raccourci la séquence de la toxine et lui ont incorporé des acides aminés qu'elle ne présentait pas naturellement. Résultat : une des toxines modifiées, nommée Pep11, est sortie du lot. Cette toxine modifiée a sur *S. aureus* un effet 13 fois supérieur à celui de PepA1, et

11 fois supérieur sur *E. coli*. De façon générale, elle est capable de détruire un large spectre de bactéries. Elle est aussi sans effet toxique détectable sur les cellules sanguines humaines aux concentrations testées, contrairement à la molécule de départ, PepA1.

Les biochimistes envisagent à présent la préparation d'un antibiotique à partir de ce peptide. Plusieurs entreprises pharmaceutiques sont intéressées, explique Brice Felden. De notre côté, il s'agit auparavant de déterminer sa pharmacocinétique, sa toxicité sur l'animal et son activité sur un modèle animal d'infection bactérienne. Pep11 pourrait également être développé pour faciliter la pénétration de molécules antibiotiques existantes, en plus de son activité antibactérienne.

Quant au risque que les bactéries développent une résistance au peptide, comme elles le font avec nombre d'antibiotiques, Brice Felden a bon espoir : « Ce risque n'est pas exclu, mais le peptide a un atout : il ne s'attaque pas à une molécule cible, mais à l'ensemble de la membrane des bactéries, qu'il pénètre et détruit. Pour résister, il faudrait donc que les bactéries changent de membrane... »

M.-N. L.

O. Solecki et al., *Chemistry & Biology*, 19 mars 2015

Au moins 50 000 décès par an

peuvent être attribués aux infections résistantes aux antibiotiques en Europe et aux États-Unis.

Archéologie

L'extraordinaire service à boire gaulois de Lavau

Qui eût cru cela possible ? La tombe à char celte fouillée à Lavau, près de Troyes, par l'équipe de Bastien Dubuis de l'Inrap, semble aussi importante que celle de la tombe de Vix. La princesse celte enterrée dans cette dernière, située en Côte-d'Or, était accompagnée d'un service à boire comportant le plus grand cratère grec jamais découvert. Or la tombe de Lavau livre aussi un extraordinaire service à boire.

La tombe de Lavau date du 7^e siècle avant notre ère. Elle a livré un char à deux roues, deux céramiques, un poignard et son fourreau ainsi que de très nombreuses traces de bois et de tissus. Toutefois, c'est son service à boire qui lui confère son rang de découverte exceptionnelle, et confirme que le culte de Dionysos, le dieu du vin et... de ses excès s'était répandu chez les élites celtes de la fin du premier âge du Fer (-800 à -450).

Sa pièce maîtresse est un chaudron en bronze de près d'un mètre de diamètre. Son bord est



A gauche, l'une des anses ornées du chaudron voisine avec l'œnochoé, à droite de la ciste.

décoré de huit têtes de félins et quatre anses circulaires ornées de têtes d'Achéloos, l'esprit-dieu du fleuve grec Achéloos. En son centre reposait l'un des éléments bien connus du culte dionysiaque : une ciste, sorte de contenant à objets sacrés.

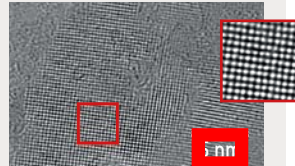
Toutefois, l'intérêt du chaudron et de ces objets est dépassé de loin par celui de la seule œnochoé accompagnée d'une passoire d'argent découverte dans le chaudron. Une œnochoé, littéralement une « pousseuse à vin », est une cruche à panse large, à une seule anse et à bec verseur trilobé. La décoration de celle de Lavau met

en scène Dionysos couché sous une vigne parlant à une femme, qui pourrait être Ariane – une mortelle censée avoir épousé Dionysos – ou Déméter, la déesse grecque de l'agriculture et des moissons souvent figurée avec Dionysos sur les œnochoés. Les deux personnages sont représentés par des figures noires sur fond rouge, un type de céramique produit dans la région d'Athènes jusqu'à la moitié du 5^e siècle avant notre ère. Pour Dominique Garcia, président de l'Inrap, cette œnochoé ornementée d'or et de filigranes est unique au monde.

François Savatier

De l'eau dans le graphène

Andre Geim a reçu le prix Nobel en 2010 pour sa découverte du graphène – une monocouche de carbone, dont les propriétés sont remarquables. Avec une équipe internationale de physiciens, il vient d'étudier le comportement de l'eau confinée entre deux couches de graphène. Lorsque les couches de graphène se rapprochent, une force attractive, de type force de van der Waals, s'exerce entre les atomes de carbone des deux couches. Les calculs montrent qu'à une distance de un nanomètre, la pression qui s'exerce sur la goutte d'eau est d'environ un gigapascal. Les images prises au microscope électronique montrent que l'eau cristallise à température ambiante, ce qui était attendu pour une pression si élevée. En revanche, la structure cristalline est rare : un maillage à carrés de 0,283 nanomètre de côté.



Physico-chimie

Le secret des caméléons : un réseau de cristaux

Comment le caméléon change-t-il de couleur ? Pour le découvrir, Jérémie Teyssier et ses collègues de l'Université de Genève ont étudié les caméléons panthères mâles en phase de combat. Ils passent en quelques minutes de l'état de repos – bleu, vert et rouge – à l'état excité – blanc, jaune-orange et rouge vermillon. L'étude révèle que leur peau est constituée de deux couches de cellules iridescentes, nommées iridophores, qui contiennent des nanocristaux de guanine, l'une des bases azotées qui composent l'ADN.

Dans chaque iridophore de la couche extérieure, les cristaux for-

ment un réseau triangulaire. Leur indice de réfraction vaut 1,83, alors que celui du cytoplasme – le milieu cellulaire environnant – n'est que de 1,33. Cette différence conduit le réseau de nanocristaux à se comporter comme un « cristal photonique » : il est opaque à la lumière dans certaines gammes de longueurs d'onde, nommées bandes de fréquences interdites et qui dépendent de la période spatiale du réseau.

Les chercheurs ont remarqué que la distance entre les nanocristaux augmente de 30% quand les caméléons s'excitent, et ils ont pu vérifier que c'est bien cette expansion du réseau qui

modifie les bandes interdites, donc la couleur des caméléons.

La couche intérieure d'iridophores, où les cristaux sont plus grands, a pour sa part la particularité de réfléchir 45% du rayonnement dans le proche infrarouge, une protection thermique utile pour les caméléons.

Il reste à déterminer les mécanismes neuronaux et hormonaux impliqués dans le fonctionnement des iridophores : le caméléon n'a pas fini de nous livrer les secrets de son étonnante parure.

Marie Perez

J. Teyssier et al., *Nature Communications*, vol. 6, 6368, 2015



Un caméléon panthère mâle (*Furcifer pardalis*) au repos.

Un bretzel de plus de 200 ans

En fouillant la boutique d'un boulanger du XVIII^e siècle à Ratisbonne, en Allemagne, les archéologues du Service bavarois de conservation sont tombés sur les restes carbonisés d'une fournée ratée. Or ces bretzels, petits pains et autres pipferls pétris il y a plus de 200 ans ressemblent beaucoup à ceux d'aujourd'hui. Ainsi, les fragments retrouvés attestent que le bretzel bavarois n'a pas changé de proportions depuis le XVIII^e siècle.

Un trou noir jeune et massif

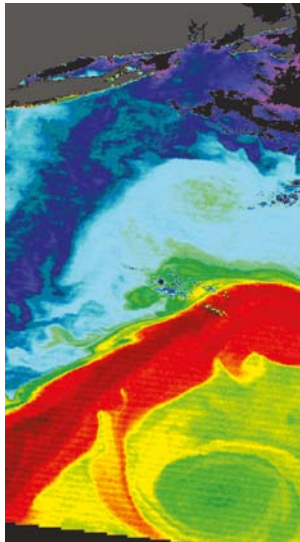
Kue-Bing Wu, de l'Université de Beijing, en Chine, et son équipe, ont découvert une galaxie contenant un trou noir supermassif de 12 milliards de masses solaires dans l'Univers jeune. Un trou noir grossit en fusionnant avec d'autres trous noirs ainsi qu'en accréant de la matière environnante, mais comment celui-ci a-t-il pu atteindre une telle masse en moins d'un milliard d'années ? D'après les chercheurs, en prenant le taux d'accrétion maximal théorique, on peut atteindre environ 13 milliards de masses solaires en un milliard d'années. Ainsi, bien qu'un tel trou noir soit rare, il ne défie pas notre compréhension de l'évolution de ces objets.

Un carré magique de cubes

En 2010, Christian Boyer, spécialiste des carrés magiques, proposait plusieurs énigmes consistant à construire des carrés magiques avec certaines contraintes. Sébastien Miquel, élève de l'École normale supérieure à Paris, vient d'en résoudre une : il a construit le premier carré magique 7×7 ne contenant que des entiers élevés au cube. Il est aussi le plus petit carré de cubes connu, battant le carré de l'Allemand Walter Trump de dimension 8×8 . Prochaines étapes, trouver des carrés 6×6 , 5×5 et 4×4 !

Géosciences

Quand les volcans commandent aux océans



Le Gulf Stream (rouge), un courant chaud qui fait partie de la circulation thermohaline.

Le Nord de l'océan Atlantique est le siège d'un immense tapis roulant : la circulation thermohaline. L'eau remonte depuis les tropiques jusqu'aux hautes latitudes où, devenue plus froide et plus dense, elle plonge puis parcourt le trajet inverse en profondeur. Elle transporte la chaleur vers le Nord, contribuant à adoucir le climat européen. Didier Swingedouw, de l'Université de Bordeaux, et ses collègues ont montré que les éruptions volcaniques majeures modifient cette circulation et, partant, le climat.

Des mesures avaient révélé des variations de la circulation thermohaline. Les chercheurs soupçonnaient une influence des éruptions volcaniques : quand elles sont assez importantes, elles projettent des poussières qui réfléchissent

le rayonnement solaire et refroidissent le climat. Elles pourraient alors faire baisser la température de l'océan en surface, et ainsi influencer les courants.

Les chercheurs ont combiné de multiples données, issues par exemple de l'analyse de carottes de glace groenlandaises, de mesures de salinité des océans et de simulations numériques, pour reconstituer les fluctuations de la circulation thermohaline sur les 1000 dernières années. Leurs résultats, croisés avec les dates des éruptions majeures, suggèrent que chacune déclenche des accélérations et des ralentissements cycliques de cette circulation, d'une période de 20 ans.

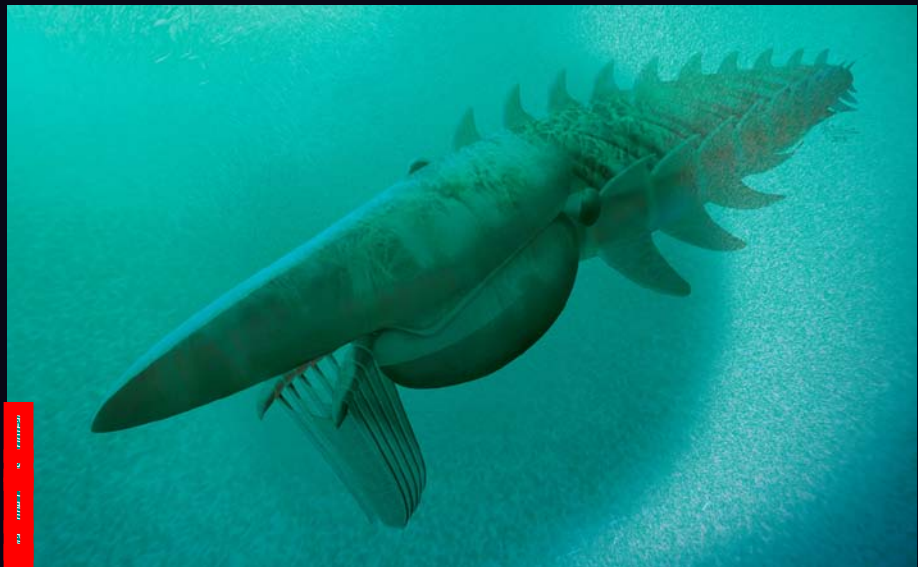
Guillaume Jacquemont

D. Swingedouw et al., *Nature Comm.*, en ligne le 30 mars 2015

Insolite

L'anomalocaride, terreur du plancton

Avec deux collègues, Peter Van Roy, de l'Université Yale, a décrit une nouvelle espèce marine à partir de fossiles découverts au Maroc. *Aegirocassis benmoulae*, de la famille disparue des anomalocarides, vivait à l'Ordovicien – il y a entre 443 et 485 millions d'années – et mesurait plus de deux mètres de long. Ancêtre des arthropodes aquatiques, se nourrissait en filtrant l'eau de mer. Une sorte de crevette géante !



Actualités

L'âne de Little Foot

Little Foot est le surnom d'un fossile d'*Australopithecus prometheus*, découvert en 1994 dans une grotte en Afrique du Sud. La datation du fossile était difficile, car l'histoire géologique de la grotte était mal connue. Darryl Granger, de l'Université de Purdue, aux États-Unis, et ses collègues ont utilisé une méthode de datation fondée sur les concentrations en aluminium 26 et béryllium 10 des cristaux de quartz. Ces éléments sont formés lors d'une exposition en surface aux rayons cosmiques. La datation de plusieurs échantillons de quartz, situés près du squelette, suggère ainsi que Little Foot est âgé de 3,67 millions d'années, ce qui en fait un contemporain de *A. afarensis* (Lucy) en Afrique de l'Est.

Neurobiologie

Des faux souvenirs créés pendant le sommeil

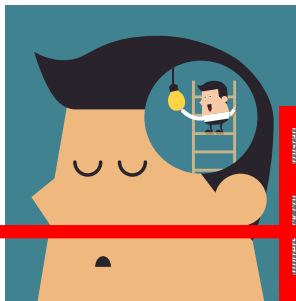
Imaginez que vous arrivez dans un lieu anodin, un coin de couloir par exemple, et qu'une sensation agréable vous envahit. Vous y revenez régulièrement, attiré par cette sensation... jusqu'à ce que vous vous rendiez compte que l'endroit n'a rien d'extraordinaire. C'est un peu ce qui est arrivé à cinq souris, dans une étude menée par l'équipe de Karim Benchenane, de l'ESPCI et de l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Les neurobiologistes ont implanté chez les rongeurs de faux souvenirs pendant qu'ils dormaient et ont montré que cela influençait leur comportement par la suite.

Lors du sommeil, le cerveau repasse les événements vécus. En particulier, les « cellules de lieu »

de l'hippocampe, qui sont des neurones associés à un endroit particulier, se réactivent. Quand cela se produisait chez les rongeurs, les chercheurs activaient le circuit de la récompense, un réseau d'aires cérébrales associé à la sensation de plaisir, grâce à des électrodes. Ils ont ainsi créé

des liens entre ce circuit et les neurones de lieu.

Les rongeurs avaient alors l'impression d'avoir vécu un moment agréable dans les endroits correspondants et ils s'y rendaient au réveil. Pour Karim Benchenane, cela suggère que « le souvenir implanté peut être perçu consciemment par la souris, qui l'utilise dans un comportement dirigé vers un but ». Il est ainsi bien plus complexe que ceux précédemment fabriqués chez des animaux endormis : « Les travaux antérieurs n'avaient créé que des réactions réflexes à des stimulus », précise le chercheur.



G. J.

G. de Lavilléon et al., *Nature Neuroscience*, en ligne le 9 mars 2015

Dans l'intérêt de la science

mathieu vidard

la tête au carré
14:05-15:00

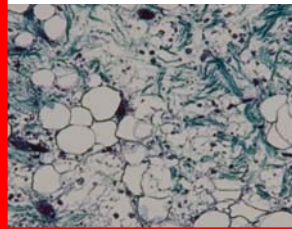
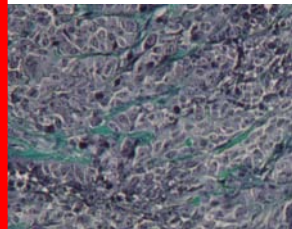
france
intervenez
franceinter.fr

Le cimetière du Monoprix

Les archéologues de l'Inrap tentent de retrouver des tombes de masse dans les caves du Monoprix Réaumur-Sébastopol à Paris. Elles correspondent aux fosses communes établies en catastrophe lors d'épidémies aux XIV^e et XV^e siècles dans le cimetière d'un hôpital parisien aujourd'hui disparu : l'hôpital de La Trinité, l'un des cinq anciens hôpitaux de la rue saint Denis. Puisqu'il résulte d'une crise de mortalité, l'important échantillon de squelettes correspondant reflète vraisemblablement la population parisienne du Moyen Âge tardif, de sorte qu'il devrait être d'un grand intérêt anthropologique. Reste à étudier ces centaines de squelettes...

Médecine

Un liposome doublement armé contre le cancer



Comparaison entre une tumeur avant traitement (en haut) et une tumeur après le traitement avec des liposomes (en bas).

Les nanothérapies offrent des perspectives intéressantes pour lutter contre les tumeurs. L'idée est d'utiliser des liposomes – des vésicules artificielles et biocompatibles – contenant des molécules actives contre les cellules cancéreuses. Il est cependant difficile de contrôler le moment et l'endroit où ces molécules sont libérées du liposome. Claire Wilhelm, à l'Université Paris-Diderot, Christine Ménager, à l'Université Pierre et Marie Curie, et leurs collègues ont exploré une piste où le liposome est muni de deux moyens d'action, déclenchés à distance par de la lumière ou un champ magnétique.

Les chercheurs ont rempli la vésicule de nanoparticules

magnétiques et fixé des photosensibilisateurs sur son enveloppe. Ils ont injecté ces liposomes directement dans la tumeur d'une souris et ont obtenu une régression totale des cellules cancéreuses. L'action du liposome est double. Un champ magnétique agite les nanoparticules, ce qui chauffe la tumeur. Éclairés au laser, les photosensibilisateurs font passer le dioxygène dans un état très réactif et toxique pour les cellules cancéreuses. Dans des expériences précédentes, chacune de ces deux actions avait été testée, mais ne suffisait pas pour détruire la tumeur. Leur action combinée, en revanche, y parvient.

S. B.

R. Di Corato et al., ACS Nano, vol. 9 (3), pp. 2904-2916, 2015

Les conférences



- à la Cité des sciences et de l'industrie
- THÈME : La science en voyage
- Migrations : une nécessité du vivant
- Cycle de 5 conférences
- 5 mai L'Homme à la conquête de la Terre avec Pascal Picq
 - 12 mai Le nomadisme : un mode de vie avec John Crowley
 - 19 mai Dans le camp des Roms avec Éric Fassin
 - 26 mai Au loup ! Un retour controversé avec Farid Benhammou
 - 2 juin Les plantes invasives : un perpétuel ajustement à notre monde avec Jacques Tassin

Programme complet sur cite-sciences.fr



Biophysique

Les acrobaties des mantes religieuses décryptées

Les sauts des jeunes mantes religieuses sont impressionnants. Plus brefs qu'un battement de cil – moins d'un dixième de seconde – ils sont d'une extrême précision. Cela leur est très utile pour se déplacer car, contrairement aux adultes, les jeunes mantes n'ont pas d'ailes.

Intrigués par ce talent acrobatique, atypique dans le monde des insectes, Malcolm Burrows, de l'Université de Cambridge, et Gregory Sutton, de l'Université de Bristol, ont étudié le phénomène et se sont aperçus que l'inclinaison du corps de l'insecte était régie par une chorégraphie bien définie de mouvements de rotation des pattes et de l'abdomen. Lorsque la mante saute, l'impulsion initiale imprime à l'insecte une certaine rotation, quantifiée par le moment cinétique. Une fois la mante en l'air, son moment cinétique total est conservé et reste quasiment constant jusqu'à l'atterrissage. Il s'agit de la somme des moments cinétiques des différentes parties du corps : l'abdomen, les trois paires de pattes, ... Quand l'une de ces parties effectue un mouvement de rotation, cela modifie son moment cinétique. Pour compenser, le moment cinétique d'une autre partie varie, ce qui change sa rotation. Les chercheurs ont dénombré quatre transferts de moment cinétique durant le saut, qui contribuent à maintenir le tronc de la mante religieuse à un angle d'environ 50 degrés par rapport à l'horizontale, afin qu'elle puisse arriver sur sa cible avec la bonne orientation. La mante religieuse a décidément le compas dans l'œil... ou dans le corps !

Il reste à présent à comprendre comment le cerveau de la mante contrôle les mouvements après que le saut a commencé, en réponse aux événements extérieurs. Les résultats pourraient s'appliquer à la conception de robots sauteurs, qui n'en sont pour l'instant qu'à leurs balbutiements.

M. P.

M. Burrows et al., *Current Biology*, vol. 25(6), pp. 786-789, 2015.

Mathématiques

Prix Abel 2015 : John Nash et Louis Nirenberg

Chaque année, l'Académie norvégienne des sciences et des lettres décerne le prix Abel à des chercheurs pour leurs travaux en mathématiques. John Forbes Nash Jr. et Louis Nirenberg partagent ce prix prestigieux pour leur contribution importante et fondamentale à la théorie des équations aux dérivées partielles non linéaires et ses applications en analyse géométrique.

John Nash est un mathématicien de l'Université Princeton qui a reçu le prix Nobel d'économie en 1994 pour ses travaux en théorie des jeux. Le film *Un homme d'exception* (Ron Howard, 2001) a fait découvrir ce mathématicien au grand public, en particulier son combat contre la schizophrénie.

John Nash s'est aussi penché sur des problèmes d'analyse géométrique. Cela l'a conduit à étudier des équations différentielles à plusieurs variables (des équations dites aux dérivées partielles) qui étaient considérées comme impossibles à résoudre. Il a alors développé une méthode itérative, modifiée par le mathématicien d'origine allemande Jürgen Moser, qui a pris le nom

de théorème Nash-Moser. En 1956, il rencontre Louis Nirenberg, de l'Institut Courant des sciences mathématiques à l'Université de New York, spécialiste des équations à dérivées partielles dites elliptiques et dont les contributions sont nombreuses (plusieurs résultats portent son nom : inégalités de Gagliardo-Nirenberg, théorie de Kohn-Nirenberg...).

Lors de cette rencontre, Louis Nirenberg suggère à John Nash de travailler sur un problème ouvert concernant des équations aux dérivées partielles dites elliptiques. John Nash le résout en quelques mois, indépendamment d'un mathématicien italien, Ennio De Giorgi. Le résultat est connu sous le nom de théorème de Nash-De Giorgi.

S. B.

www.abelprize.no



John Forbes Nash Jr. (à gauche) et Louis Nirenberg (à droite).

Une faille dans les écoducs

James Baxter-Gilbert et ses collègues, de l'Université Laurentienne au Canada, ont évalué l'efficacité des écoducs, passages souterrains aménagés pour que les animaux traversent une route sans danger. Ils ont observé des reptiles sur un tronçon routier en comparant la situation avant et après l'installation des passages et de clôtures. Les animaux utilisent les écoducs, mais préfèrent passer sur la route en profitant de brèches dans les clôtures. Ainsi, le succès des écoducs dépend de la bonne conception des barrières.

Une supernova lointaine passée à la loupe

Quatre images de la supernova SN Retzsdal, située à 9,3 milliards d'années-lumière de la Terre, ont été détectées par Patrick Kelly, de l'Université de Californie à Berkeley. Cette « croix d'Einstein » est l'œuvre de l'amas de galaxies MACS J1149.6+2223.

qui a joué le rôle de lentille gravitationnelle. En effet, les corps très massifs peuvent, en raison de leur fort champ gravitationnel, dévier les rayons lumineux qui passent à proximité et ainsi créer une image amplifiée, voire multipliée, d'une source située en arrière-plan.

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



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Loi sur la biodiversité : les scientifiques au pied du mur

Ambitieux, le projet de loi français sur la biodiversité révèle l'ampleur des recherches transdisciplinaires à effectuer pour le concrétiser.

Denis COUVET et Anne TEYSSÈDRE

Près de 40 ans après la première loi de protection de la nature [1976], le Parlement français a voté, le 26 mars dernier, le projet de loi relatif à la biodiversité soumis par le gouvernement. Il était temps. Seuls 22% des habitats et 28% des espèces d'intérêt communautaire sont en bon état, selon le préambule du projet de loi. Protéger des espaces et des espèces menacées ne suffit pas à enrayer la perte de biodiversité. Globalement, malgré quelques critiques et réserves, ce projet de loi est novateur et opportun. Il prend acte de l'impact croissant et souvent négatif des activités humaines sur la biodiversité tant remarquable qu'ordinaire, des populations d'organismes aux écosystèmes et paysages. Il modernise la prise en compte de la biodiversité dans le code de l'environnement en intégrant ses multiples dimensions : structurelle (patrimoniale), mais aussi évolutive et dynamique (se démarquant de la notion naïve d'équilibre de la nature) et, enfin, fonctionnelle, notamment pour les humains. Cette dernière dimension fonde le concept de « services écosystémiques », les services rendus aux sociétés par la biodiversité.

La future loi ambitionne de donner aux citoyens, tous acteurs socio-économiques, les moyens d'une gestion collective raisonnée et concertée de leurs territoires. Pour ce faire, son Titre I (articles 1 à 4) vise à renouveler la

vision de la biodiversité chez les acteurs et les principes d'action – deux objectifs prioritaires bien identifiés. Sur le plan opérationnel, la loi statue sur la gouvernance de la biodiversité aux niveaux national et régional (Titre II). Elle prévoit aussi la création d'une Agence française pour la biodiversité, qui appuiera la prise en compte de la biodiversité dans les projets d'aménagement (Titre III) ; la mise en place d'un cadre juridique pour les ressources

Les écologistes admettent mal la pertinence des outils économiques pour préserver la biodiversité.

génétiques et les connaissances traditionnelles, afin d'éviter la biopiraterie (Titre IV) ; la simplification des outils de préservation (Titre V) ; et un élargissement de la préservation des paysages (Titre VI).

Ces ambitions ne sont pas sans risques. Le législateur est amené à manipuler des concepts scientifiques récents, complexes et souvent flous : biodiversité, services écosystémiques... Or l'urgence de la préservation des systèmes écologiques et d'une meilleure gestion des territoires requiert une traduction sociale de ces concepts, invitant les scientifiques à répondre au mieux à une demande politique majeure qu'il s'agira de traduire en termes scientifiquement rigoureux

d'indicateurs, de scénarios, etc. Aussi, cette loi interpelle-t-elle les scientifiques à plusieurs titres.

Par exemple, pour prendre en compte la biodiversité dans les décisions environnementales, la question de sa mesure s'impose : à quel niveau d'organisation biologique, à quelle échelle spatiale ? Comment interpréter les dynamiques divergentes à différentes échelles spatiales ? Il s'agit aussi de traduire ces dynamiques en termes de fonctionnement des écosystèmes.

La loi intègre la dimension dynamique de la biodiversité. Loin d'être une collection d'objets, celle-ci constitue un ensemble d'organismes vivants ou de systèmes écologiques en interaction et évolution continues, avec un potentiel d'adaptation à préserver. Au-delà de certains succès des politiques de préservation de la nature, dont elle prend acte, la loi souligne l'importance d'aller plus loin, notamment en prenant en compte la biodiversité ordinaire (400 millions d'oiseaux perdus en 30 ans en Europe, quelles conséquences écologiques, sociales ?), et introduit la notion de valeur écologique des habitats et milieux de vie (écosystèmes), elle aussi à expliciter.

De même, la notion de service écosystémique bouscule le monde des chercheurs. Elle interpelle nos conceptions de l'organisation sociale, exigeant de considérer la dimension irréductiblement collective du fonctionnement des écosystèmes, des interdépendances, de

échelle locale à celle de la biosphère. À ce titre, la loi introduit une notion importante : la solidarité écologique. Chacun de nous dépend de la bonne gestion de la biodiversité par les autres, que ce soit pour être protégé des crues, bénéficier d'eau et d'air de qualité, ou encore d'un climat favorable. Le dioxyde de carbone stocké dans les forêts amazoniennes conditionne le climat en Europe. Des pollutions sur les terres agricoles ont une incidence sur la qualité de l'eau dans leur bassin versant. Ces interdépendances devront être prises en compte par l'action publique. Grand progrès ! Toute la difficulté consistera, pour les chercheurs, à proposer des outils adéquats. Savoir déterminer les écosystèmes dont les fonctionnalités sont les plus importantes et les mesures sociales les plus légitimes pour préserver ces fonctionnalités. La loi s'intéresse hélas encore trop peu à la distribution sociale des coûts et bénéfices de la préservation ou de la destruction de la biodiversité.

Un objectif controversé est d'assouplir la préservation de la biodiversité, afin de mieux la concilier avec les activités humaines : éviter les mesures trop rigides qui conduisent à des conflits humains inutiles. Comment ? Notamment en créant un système de compensation écologique des impacts : une entreprise construit, paye pour une compensation ailleurs, et une autre entreprise-opérateur se charge de réaliser cette compensation. Cette ambition n'est pas sans ambiguïté – la conciliation entre biodiversité et activités humaines peut s'entendre de manières très différentes – ni sans danger. Cette souplesse peut améliorer l'acceptabilité sociale de la préservation de la biodiversité, mais elle peut aussi favoriser sa dégradation, si elle devient une financiarisation de la biodiversité. La façon dont elle sera utilisée est un enjeu important. Les scientifiques devront fournir des outils d'évaluation et de gestion suffisamment rigoureux et légitimes pour que les conséquences des compensations, leurs effets sur les infrastructures, puissent être discutées par les acteurs en vue de respecter à la fois maintien de la biodiversité et aspirations humaines légitimes.

Ce point révèle une ambiguïté de la loi : si elle anticipe bien les enjeux socio-économiques de la biodiversité, elle semble



LORSQU'UN PROJET DE CONSTRUCTION est envisagé dans un site non protégé, la loi rappelle qu'après avoir réduit au minimum les impacts sur la biodiversité, il importe de compenser les impacts résiduels en tenant compte de la valeur écologique des écosystèmes touchés. La prise en compte de la biodiversité ordinaire et de ses services écologiques devrait contribuer à éviter les projets dont l'utilité sociale ne justifie pas sa destruction.

LES AUTEURS



Denis COUVE est directeur du département Écologie et gestion de la biodiversité du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Anne TEYSSERE est écologue, chercheuse associée à ce département.

sous-estimer la dépendance des sociétés au fonctionnement des écosystèmes qu'elles habitent ou exploitent. Seule la valeur économique des services écosystémiques est mise en avant alors que ces « services » sont avant tout écologiques. Les chercheurs sont divisés sur ce point. Les sciences sociales sous-estiment parfois les déterminants écologiques des conflits sociaux. À l'inverse, biologistes et écologues ont souvent du mal à admettre que l'économie puisse être un outil de préservation de la biodiversité. Plus que jamais, ce flou appelle une approche transdisciplinaire du problème ; et même conjointe avec les réflexions sur le changement climatique, lequel soulève les mêmes interrogations.

Le projet de loi est ambitieux et bienvenu. Toute la question est de savoir si la société – pouvoirs publics, acteurs et citoyens, électeurs – se donnera les moyens de l'appliquer et de le traduire en actes concrets. ■



Réagissez au
Point de vue sur
www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

« L'innovation thérapeutique est en panne »

Où en est le développement de nouveaux médicaments ? Malgré la pléthore de produits proposés sur les rayonnages des pharmacies, la chimie thérapeutique marque le pas. Le chimiste toulousain Bernard Meunier nous explique pourquoi.



Bernard MEUNIER est directeur de recherche émérite au CNRS et président de l'Académie des sciences.

Développer de nouveaux médicaments coûte de plus en plus cher, ce qui est une des principales raisons de

en grands groupes. Cependant, il semble que la constitution de ces géants de la pharmacie n'a pas apporté que les bienfaits à l'innovation thérapeutique. Pour Bernard Meunier, la prise des risques et l'esprit pionnier en ont pâti.

POUR LA SCIENCE

Quelles sont aujourd'hui les grandes tendances de l'innovation thérapeutique ?

Bernard Meunier : Les grands groupes pharmaceutiques (Pfizer, Novartis, Roche, Merck, Sanofi, etc.) tendent à se concentrer sur des secteurs précis, essentiellement les cancers et les maladies dites orphelines (celles qui n'ont pas de traitement efficace). Le reste devient plutôt l'apanage des petites ou moyennes entreprises.

Par ailleurs, l'accent est mis sur ce qu'on appelle la biopharmaceutique (anticorps monoclonaux, thérapie cellulaire, thérapie génique, etc.). Du coup, les grands groupes laissent moins de place à la recherche et au développement sur les « petites molécules », c'est-à-dire des molécules constituées de quelques dizaines ou

centaines d'atomes fabriquées chimiquement et non produites par des entités biologiques.

PLS

Cela signifie-t-il que le domaine des « petites molécules » est moins prometteur ?

B. M. : Non, au contraire. Plus de 80 % des nouvelles molécules thérapeutiques approuvées au cours des 20 dernières années sont des petites molécules. Et il reste énormément à faire : on n'a exploré qu'une minuscule partie de l'ensemble des molécules possibles. Par exemple, en 2007, des chercheurs ont fait remarquer qu'avec 11 atomes de carbone, d'azote, d'oxygène ou de fluor, il y a environ 26 millions de molécules possibles, alors que seulement 63 850 molécules avaient été préparées. Autrement dit, on n'a exploré qu'environ 0,3 % des possibilités !

De plus, le développement de petites molécules thérapeutiques est plus facile et moins coûteux, car les outils de la physico-chimie et de la biologie structurale permettent aujourd'hui d'analyser ces molécules et leurs cibles beaucoup plus vite que par le passé.

PLS

Et pourtant, l'innovation thérapeutique ne vous paraît pas à la hauteur des espoirs

suscités par les progrès de la biologie au cours des 20 dernières années.

Qu'est-ce qui vous fait penser cela ?

B. M. : L'innovation thérapeutique est en panne, et de nombreux exemples en témoignent. Nous n'avons aucun traitement efficace contre la maladie d'Alzheimer, alors qu'elle pèse de plus en plus sur les pays développés. Nous n'avons pas de bons médicaments antiviraux, comme l'ont montré la récente épidémie de fièvre Ebola et d'autres maladies infectieuses émergentes ; nous n'en avons même pas contre une banale grippe. Trente ans après l'identification du virus du sida, il n'y a toujours pas de vaccin. Nous n'avons pas de médicaments efficaces contre les bactéries devenues multirésistantes aux antibiotiques. Nous sommes toujours assez démunis contre les maladies parasitaires, tels le paludisme ou la bilharziose.

PLS

Les obstacles sont-ils uniquement scientifiques ?

B. M. : Il existe bien sûr des obstacles de nature scientifique. Les pics les plus faciles ont été escamotés, ceux qui restent sont plus récalcitrants. Les maladies neurodégénératives, par exemple,

sont difficiles à étudier parce que le cerveau n'est pas un organe facilement accessible : il est protégé par une boîte crânienne et par une barrière physiologique, la barrière hémato-encéphalique. Quant à l'imagerie cérébrale, elle n'a pas encore atteint une résolution permettant de voir ce qui se passe à l'échelle des neurones. Et l'on manque de modèles animaux pertinents.

Ainsi, dans le cadre des recherches pour un remède à la maladie d'Alzheimer, 100 % des 413 essais cliniques réalisés dans le monde entre 2002 et 2012 se sont soldés par un échec (108 essais cliniques sont en cours aujourd'hui). Dans le domaine du cancer, le bilan est moins négatif, le taux d'échecs des essais cliniques étant de 30 % ; qui plus est, les 20 % de succès sont des améliorations par rapport aux meilleurs traitements disponibles avant l'essai – alors que la maladie d'Alzheimer n'a encore aujourd'hui aucun traitement efficace.

Mais aux obstacles de nature scientifique se sont ajoutées bien d'autres difficultés, et ce sont probablement ces dernières qui jouent le rôle de premier plan.

PLS
De quels types de difficultés s'agit-il ?

B. M. : L'innovation thérapeutique est confrontée à des obstacles d'ordres multiples : financier

économique, industriel, organisationnel, réglementaire, etc. L'un des principaux est le coût de plus en plus élevé du développement d'un nouveau médicament. Actuellement, il est de l'ordre du milliard d'euros, une somme colossale qui n'est à la portée que des grands groupes pharmaceutiques.

Les dirigeants des grands groupes pharmaceutiques sont surtout des managers et non des créateurs.

tiques. C'est d'ailleurs pourquoi on a assisté au cours des années 1970-2000 à la constitution de tels grands groupes, par un processus de fusion-acquisition d'entreprises pharmaceutiques plus petites.

PLS
Pourquoi le coût de développement d'un nouveau médicament augmente-t-il ?

B. M. : Outre la difficulté scientifique, qui a augmenté la durée des recherches, la hausse du coût porte surtout sur la partie finale du processus de développement, en particulier les essais cliniques de phase III, où l'on évalue l'efficacité de la molécule (voir l'encadré page 18). Ces essais sont très coûteux, car ils sont menés sur des milliers de patients. À cela s'ajoute une réglementation de plus en

plus tatillonne, qui a pour effet d'augmenter la paperasserie et la durée des procédures. Or, dans le domaine pharmaceutique, 80 % des coûts sont dus aux salaires : l'allongement des durées se répercute directement sur le coût.

PLS
La concentration du secteur pharmaceutique en grands groupes a-t-elle eu des effets négatifs sur l'innovation ?

B. M. : Oui, pour diverses raisons. Étant donné les énormes capitaux et effectifs que ces grands groupes ont à gérer, l'organisation et l'administration de ces entreprises sont devenues plus complexes et plus lourdes. Ceux qui les dirigent sont donc surtout des managers et non des créateurs, ce qui peut freiner la prise de risques et l'innovation et favoriser les visions à court terme. Il faudrait plus de scientifiques, et en particulier des chimistes, dans les comités de direction...

La recherche pharmaceutique est un système où l'on peut perdre beaucoup d'argent – un essai clinique de phase III coûte quelque 200 à 300 millions d'euros. Les grands groupes limitent donc les risques sur les domaines où le retour sur investissement est incertain.

C'est le cas pour des maladies telles que le paludisme, qui tue environ 700 000 personnes chaque année dans le monde, et pour les maladies tropicales négligées telles que la bilharziose, qui touche environ 260 millions de personnes.

LA BILHARZIOSE est une maladie tropicale due à un petit ver trématode du genre *Schistosoma* dont l'hôte intermédiaire est un petit escargot d'eau douce. C'est la plus meurtrière des maladies dites négligées. Environ 200 000 personnes en meurent chaque année. Elle frappe surtout les pêcheurs et agriculteurs en contact avec des eaux contaminées, principalement en Afrique. L'arsenal thérapeutique se limite à une seule molécule, le praziquantel, développée il y a 40 ans.



Essais cliniques

Le développement d'une molécule thérapeutique comporte généralement trois phases d'essais cliniques sur des sujets humains. Ces trois phases sont précédées d'une phase préclinique d'études sur des cellules, des tissus ou des animaux. Après l'autorisation de mise sur le marché, un suivi à long terme du traitement, la « phase IV », est effectué.

Phase I : Les essais de cette phase portent sur la tolérance à la molécule et l'absence de toxicité.

Phase II : Dans cette étape (l'« étude pilote »), on détermine la dose optimale du médicament et ses éventuels effets indésirables sur quelques centaines de malades.

Phase III : Les essais de cette « étude pivot » consistent à comparer le traitement par la molécule soit à un placebo, soit à un traitement de référence, sur des groupes de plusieurs milliers de sujets.

SUR LE WEB

Les cours donnés au Collège de France par Bernard Meunier dans le cadre de la chaire Innovation technologique Liliane Bettencourt 2014-2015 sont disponibles en audio et vidéo sur www.college-de-france.fr

chiffres de l'OMS pour 2013) et qui en tue près de 200 000 chaque année.

Ainsi, il y a quelques années, nous travaillions dans le cadre de l'entreprise *Palumed* sur une molécule antipaludique prometteuse, mais nous avons abandonné en 2010, le groupe *Sanofi* ayant annoncé à investir dans son développement. Pour la bilharziose, le désintérêt de l'industrie pharmaceutique est encore plus net et l'on peut parler de maladie super-négligée !

PLS

Quel est aujourd'hui le paysage international de la recherche et de l'industrie pharmaceutiques ?

B. M. : Les deux pôles mondiaux du secteur pharmaceutique se trouvent à Boston, aux États-Unis, et à Shanghai, en Chine. Les grands groupes y ont tous un pied. On y trouve un tissu économique et industriel dans lequel s'épanouissent de nombreuses entreprises plus petites, innovantes, et dont profitent les grands groupes pharmaceutiques.

La Chine monte en puissance et a une claire volonté de faire de l'innovation. Cela nécessite des cerveaux et de l'argent ; ce pays a les deux. En matière de fabrication des médicaments, un autre pôle qui s'est constitué est l'Inde. L'Europe a une position plus secondaire, bien que subsistent des centres de recherche par exemple en Angleterre (à Cambridge), en Allemagne (à Munich), en Suisse (l'EPFL, à Lausanne), ainsi que quelques grands groupes (*GlaxoSmithKline* en Grande-Bretagne, *Sanofi* en France...). Quant à la France, son secteur pharmaceutique rivalisait avec celui des États-Unis dans les années 1960. On en est loin aujourd'hui...

PLS

Pourquoi la France a-t-elle décroché dans ce domaine ?

B. M. : Notre pays n'a pas su recréer le tissu industriel qui existait dans les années 1950 ou 1960. Dans le passé, des pharmaciens ou des scientifiques pouvaient créer assez facilement de petits laboratoires privés, qui contribuaient notamment au développement de nouveaux médicaments. De nos jours, monter une telle « start-up », pour utiliser le jargon moderne, est plus compliqué et plus coûteux. Et avec le

processus de concentration en grands groupes, de nombreux laboratoires de recherche pharmaceutique ont disparu au cours des 30 dernières années.

La France ne s'est pas adaptée à la nouvelle situation : le gouvernement a perdu de sa puissance financière et il y a trop peu de fondations pour prendre le relais. À l'inverse des États-Unis, où quelque 1 800 fondations privées injectent dans le domaine de la santé plus d'argent que les agences fédérales. On peut aussi pointer l'effet négatif de la loi sur les 35 heures de travail hebdomadaire, inadaptée à ce domaine concurrentiel où, d'habitude, les chercheurs des laboratoires privés ne comptent pas leur temps.

PLS

Que faudrait-il faire pour relancer l'innovation thérapeutique en France ou en Europe ?

B. M. : Il faudrait changer beaucoup de choses, des mentalités en particulier. La recherche et le développement dans le domaine pharmaceutique, c'est surtout des talents et de l'argent. Il faut savoir dénicher les individus qui ont des talents de créateurs et leur donner les moyens de prendre des risques, de sortir des sentiers battus. Si la recherche au sein des grands groupes est devenue moins efficace, c'est aussi parce que ces entreprises pharmaceutiques ont une confiance exagérée dans les techniques à la mode, les méthodes robotisées par exemple, dont le bilan se révèle décevant. Il faut faire davantage confiance aux créateurs et aux idées originales. En France comme ailleurs.

Dans ce domaine où les échecs sont bien plus fréquents que les succès (contrairement au secteur de l'aéronautique, par exemple), il faut développer la culture du risque, et savoir financer la prise de risques. Le secteur pharmaceutique français a notamment besoin de fondations puissantes, capables d'injecter chacune de l'ordre d'un milliard d'euros dans des entreprises qui feraient subir à leurs molécules des essais cliniques de phase I et II, domaine où les grands groupes pharmaceutiques rechignent à s'impliquer. Des fondations que l'on pourrait créer et financer en défiscalisant par exemple l'ISF (l'impôt sur la fortune)...

Chronos recueillis par Maurice MASHAAL



Offre DÉCOUVERTE



Le magazine mensuel
Pour la Science (12 n°s/an)

4,66 €/mois seulement
ou 56€ pour 1 an

VOS AVANTAGES ABONNÉ

- ✓ 25 % d'économie et plus par rapport au prix en kiosque
- ✓ L'envoi des magazines en avant-première
- ✓ La garantie de ne manquer aucun numéro

BULLETIN D'OFFRE DÉCOUVERTE

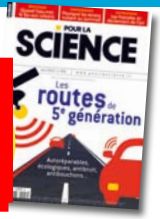
Année 90 387-75 781 Paris cedex 11



MA FORMULE

☐ **OUI, je m'abonne à l'Offre Découverte à 4,66 € par mois** ou 56 € pour 1 an. Je reçois le magazine Pour la Science (12 n°s/an) et bénéficie des versions numériques offertes sur www.pourlascience.fr

☐ **Mon e-mail obligatoire pour l'accès aux contenus numériques (à remplir en majuscules)**



MES COORDONNÉES

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____

MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Je règle par prélèvement **4,66 € par mois**. Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC.

AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT

En signant ce mandat, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. J'ai le droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

1 - COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPT

Nom, prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

2 - COORDONNÉES BANCAIRES

BAN : _____

BIC : _____

_____ Paiement récurrent/renouvelé

3 - DATE ET SIGNATURE OBLIGATOIRE

À _____

Date : _____

Signature : _____

NOM DU CRÉANCIER ICS N° FR92ZZ42690

Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

N° de référence unique de mandat (RUM)

☐ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 56 €**

_____ Paiement unique

☐ 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.

Les vestiges du Proche-Orient antique en péril

par Cécile Michel, sur le blog *Brèves mésopotamiennes*

Après le vol de manuscrits conservés à la bibliothèque de Mossoul, en Iraq, le groupe islamiste Daesh s'en prend désormais aux antiquités néo-assyriennes (900-612 avant notre ère) et parthes (150-40) du musée de cette même ville, et peut-être aussi aux sites mêmes de Nimrud (l'ancienne Kalhu assyrienne), Khorsabad (l'ancienne Dûr-Sharrukîn) et Hatra. L'organisation djihadiste a mis en ligne une vidéo, probablement tournée en août 2014, montrant ses membres détruire des originaux et des répliques de statues et reliefs de Ninive et de Hatra exposés au musée de Mossoul, ainsi que des représentations colossales de taureaux androcéphales ailés gardant la porte de Nergal à Ninive, sous prétexte qu'il s'agit de représentations païennes mises au jour par des Occidentaux.

Ninive, située à Tell Nebi Yunus – lieu du tombeau du prophète Jonas, également détruit en juillet dernier – est la plus célèbre des capitales assyriennes en raison de son gigantisme rappelé par le texte biblique. Assurbanipal (668-627) y laissa en son palais une grande bibliothèque savante contenant entre autres le récit de l'épopée de Gilgamesh, présentant une version du Déluge antérieure à celle de la Bible. Confondue par les auteurs classiques avec Babylone, Ninive abritait peut-être les fameux « jardins suspendus de Babylone ». À Kalhu, les murs du palais d'Assurnazirpal II (883-859) étaient couverts de bas-reliefs présentant le roi dans des cérémonies rituelles ou en campagne militaire, pour beaucoup laissés *in situ*. Dûr-Sharrukîn fut créée de toutes pièces par Sargon II (721-705) et inaugurée par le roi à la veille de sa mort.

Daesh s'est emparé de la région de Ninive l'été dernier pour y imposer sa loi.

Des centaines d'autres sites de cette zone sont en grand danger. Mais cela fait déjà un quart de siècle que le patrimoine irakien est dévasté par les guerres successives. Les vols ont commencé en 1990 lors de la guerre du Golfe et de l'embargo imposé à l'Iraq par les Nations unies, qui a laissé la population exsangue. Le pillage a explosé



Relief du palais nord-ouest d'Assurnazirpal II à Kalhu, conservé *in situ*. L'organisation Daesh a annoncé avoir détruit ces vestiges

avec l'invasion américaine en 2003 et la saccage du musée national de Bagdad. Alors que le musée rouvre enfin ses portes au public, deux tiers des 15 000 objets volés manquent toujours à l'appel. Des fosses ont été creusées par les pillards sur de nombreux sites du sud de l'Iraq à la recherche d'antiquités à vendre. Umma, Larsa et Isin ressemblent à des paysages lunaires. Le pays compte plus de 10 000 sites archéologiques ; dans le sud, plus d'un tiers sont irrémédiablement détruits.

L'Iraq n'est pas le seul pays du Proche-Orient à perdre son passé. En Syrie, au-delà d'un bilan humain terrible (220 000 morts), ce sont plus de 300 sites archéologiques

qui ont été pillés et détruits depuis le début du conflit en mars 2011 ! Alep, Damas, Palmyre, Ebla ou encore Mari, fleuron de l'archéologie française depuis 1933, ont subi des dommages importants. Les images satellitaires récentes montrent la surface de ce dernier site criblée de plus de 1 300 cratères ! Là aussi, le commerce des antiquités est contrôlé par Daesh, afin de financer la lutte armée. Les sommes recueillies sont considérables. Les acheteurs se rendent complices de la dilapidation du patrimoine culturel de l'humanité. Les objets, une fois arrachés à leur contexte archéologique, ont perdu une partie de leurs informations – pour ceux qui réapparaissent. Quant aux autres, ils n'existent pas aux yeux des scientifiques, n'ayant pas été répertoriés.

Qui aidera les archéologues syriens, irakiens et internationaux qui luttent pour arrêter le pillage à la source et répertorier les dommages subis ? Beaucoup ont lancé des appels pour mobiliser gouvernements et populations : assyriologues et archéologues (voir <http://iaassyriology.org/> et <http://shirin-international.org/>), l'Unesco ou le Conseil de sécurité de l'ONU. Mais comment arrêter cette folie humaine ?



Cécile MICHEL est assyriologue et directrice de recherche CNRS au laboratoire Archéologies et Sciences de l'Antiquité, à Nanterre. Elle préside l'International Association for Assyriology et tient

le blog *Brèves mésopotamiennes* www.sciLogs.fr/brevs-mesopotamiennes/



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

UN ÉVÉNEMENT



RADIO FRANCE

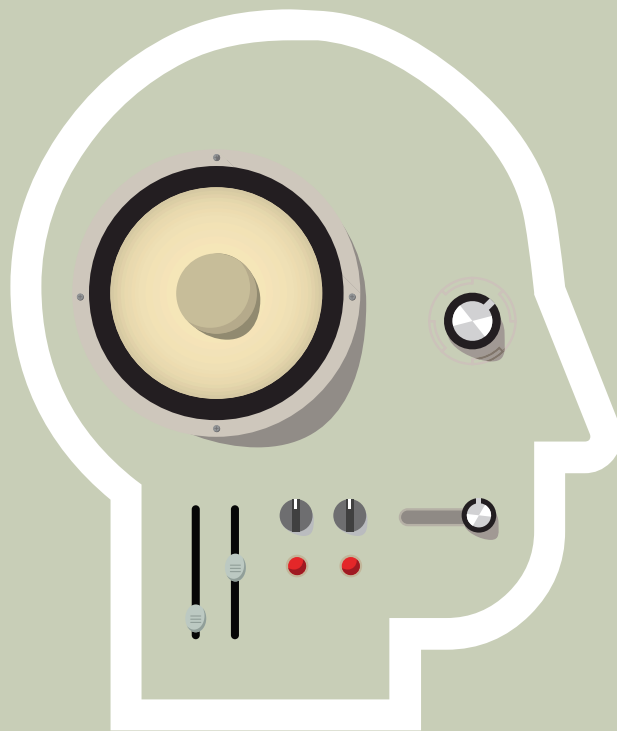
Cycle MUSIQUE & CERVEAU

**SAMEDI
13 JUIN
2015**

**MAISON
DE LA
RADIO**

**MUSIQUE,
MÉMOIRE &
APPRENTISSAGE**

**Grand témoin :
ANTOINE HERVÉ**



Avec la participation de

Francis Eustache
et Olivier Houdé

Animé par Hervé Platel

- > La mémoire et le cerveau, des amnésies aux techniques de neuroimagerie
- > Le cerveau de l'apprentissage - Qu'est-ce qu'un cerveau qui apprend bien ?
- > La mémoire musicale est-elle spéciale ?

Prochaine conférence

samedi 12 Septembre 2015
Musique et santé.
Grand témoin : JULIETTE

Avec la participation de Pierre Lemarquis > Soigner par la musique - Histoire et hypothèses
et de Daniele Schön > La musique au secours du langage - Dyslexie et surdité
Animé par Hervé Platel > Musicothérapie et cerveau

Musique et Santé

Mail : info@musique-sante.org
Tél : 04 94 07 76 19
Inscription :
<http://www.musique-sante.org>

Coût :

Prise en charge formation continue/OPCA
Par conférence : 95 €
Pour le cycle de trois conférences : 240 €

Prise en charge individuelle :

Par conférence : 80 €
Pour le cycle de trois conférences : 200 €

Cerveau & Psycho



SACEM UNIVERSITÉ

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Débattre ou argumenter

*Tester un programme ou démontrer qu'il est correct ?
La seconde voie, plus satisfaisante, est à privilégier.
Pas seulement en informatique...*



Les informaticiens ont inventé de nombreuses méthodes pour éviter que leurs programmes comportent trop d'erreurs. Une première consiste, après avoir écrit un programme, à le tester sur quelques centaines ou milliers de cas. Par exemple, un programme qui cherche la sortie d'un labyrinthe étant achevé, on peut le tester sur quelques centaines ou milliers de labyrinthes différents. Si le programme fait, à chaque fois, ce que l'on attend de lui, on acquiert une certaine confiance inductive dans sa correction. Mais comme on ne peut pas tester tous les cas possibles, rien n'empêche qu'un jour apparaisse quand même une erreur.

Une deuxième méthode consiste à démontrer que le programme proposé est correct, c'est-à-dire à construire une preuve mathématique que, dans tous les cas imaginables, il fera ce que l'on attend de lui. Par exemple, après avoir écrit un programme qui cherche la sortie d'un labyrinthe, il s'agit de démontrer que ce programme trouvera toujours une sortie, s'il en existe une. Démontrer la correction d'un programme est plus difficile que le tester, mais, quand on y parvient, on est à peu près sûr qu'aucun bug ne se manifestera lorsque le programme sera en exploitation.

La notion de démonstration rapproche l'informatique des mathématiques, mais la notion de test l'en éloigne. En mathématiques, si l'on veut se convaincre que, par exemple, le résultat de la multiplication $a \times b$

de deux nombres p et q est toujours identique à celui de la multiplication $q \times p$, la seule méthode possible est la démonstration. Bien entendu, rien n'interdit de tester quelques cas tels que 3×7 et 7×3 , 12×25 et 25×12 , etc. pour se familiariser avec le problème, ou pour formuler une conjecture, mais ces tests ne contribuent jamais à un jugement de vérité.

Contrairement à une démonstration, qui implique une seule personne, le test d'un programme peut être vu comme un

**Il ne suffit pas
d'écarter les objections
de ses interlocuteurs
pour avoir raison.**

dialogue entre deux personnes fictives : l'auteur du programme, qui affirme que son programme est correct, mais sans expliquer pourquoi, et le testeur, qui objecte à cette affirmation une situation où le programme sera éventuellement mis en échec. Si ce n'est pas le cas, l'objection est écartée. Et si toutes les objections du testeur sont écartées, le programme est réputé correct. Une démonstration, en revanche, écarte d'avance non seulement les objections d'un hypothétique testeur, mais toutes les objections possibles.

Le test repose donc sur un étrange renversement de la charge de la preuve : ce n'est plus l'auteur du programme qui doit expliquer pourquoi ce dernier est correct

mais c'est son interlocuteur qui doit trouver une situation dans laquelle l'affirmation du programmeur est mise en échec.

Cependant, ne pas être mis en échec par son interlocuteur ne signifie pas que l'on a raison ; cela peut aussi signifier que l'interlocuteur n'a pas trouvé la bonne objection. C'est pourquoi le fait qu'un programme ait été testé n'exclut jamais qu'une erreur se produise, un jour, dans une situation non explorée par les tests. Et c'est pourquoi la méthode mathématique ne consiste pas à tenir n'importe quelle proposition pour « vraie jusqu'à preuve du contraire » ; de façon générale, la démarche scientifique n'accepte les arguments inductifs que s'il n'est pas possible d'avancer des arguments déductifs.

Cela nous mène à regarder d'un oeil suspect la prééminence que notre société accorde aux méthodes dialogiques, et notamment au débat contradictoire, au détriment des méthodes logiques. Comme si nous feignons de croire qu'écarter les objections de ses interlocuteurs suffisait pour avoir raison.

Avant une élection, par exemple, au lieu d'organiser un débat entre les candidats, pourquoi ne les laisserions-nous pas plutôt étayer leurs affirmations par des arguments, leur laissant ainsi la charge de la preuve de ce qu'ils affirment ?

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

L'ancien PDG de *Microsoft* nous promet un robot dans chaque foyer



Les ROBOTS

en quête d'humanité

DOSSIER POUR LA SCIENCE - INTELLIGENCE ARTIFICIELLE - ROBOTIQUE - INFORMATIQUE



MÉDECINE

Des prothèses pour des humains augmentés !

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

La menace d'une dictature invisible

N° 87 Avril-Juin 2015

pourlascience.fr

www.pourlascience.fr

le site de référence de l'actualité scientifique internationale



Disponibile su



CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES par Gérald Brunner

Plus humains grâce aux robots

En nous affranchissant des tâches automatisables et en nous laissant les autres, les robots renforceront peut-être notre humanité, c'est-à-dire ce qui nous est propre.

Le remplacement de l'activité humaine par celle des robots ou même la crainte qu'une intelligence artificielle ne se retourne contre l'humanité traversent l'imaginaire de la science-fiction depuis longtemps. En témoignent, ses expressions les plus populaires à travers des films tels que *Matrix* ou *2001, l'Odysée de l'espace*.

Avant d'imaginer que Skynet (la maléfique intelligence artificielle de la série *Terminator*) va provoquer l'apocalypse, nous pouvons considérer le remplacement prévisible de certaines de nos activités par des robots. Prenons l'exemple du recrutement. Depuis les années 2000, 95 % des grandes entreprises et la moitié des autres recourent à un système automatisé de traitement de CV nommé ATS (*Applicant Tracking System*), qui traque les mots-clés désirés selon le type de poste.

Le fait d'être sélectionné en première instance par une machine n'est pas réjouissant, mais, sachant que certains cabinets de recrutement utilisent l'astrologie ou la graphologie pour évaluer leurs candidats, ne vaut-il pas mieux avoir affaire à un algorithme sévère, mais juste ? D'ailleurs, l'ATS n'est utilisé que pour un premier tri des CV ; viennent ensuite les entretiens d'embauche qui, pour l'instant, sont menés par des humains.

« Pour l'instant », car les progrès dans le domaine de l'intelligence artificielle promettent de beaux développements dans celui de l'analyse sémantique. Il n'est ainsi pas impossible qu'à moyen terme le métier de traducteur finisse par disparaître, concurrencé qu'il sera par des systèmes

automatisés infiniment moins coûteux, plus rapides et peut-être aussi efficaces.

De façon générale, il est probable que tout ce qui peut être automatisé dans les activités humaines le sera. Certains économistes évaluent à 47 % le nombre d'emplois aux États-Unis qui seront informatisés-automatisés dans les 20 prochaines années.

Cette tendance ne date pas d'aujourd'hui, mais, pendant un temps, elle a surtout



LES ROBOTS NOUS LIBERERONT
de tout ce qui peut être automatisé.
au bénéfice de la créativité humaine.

concerné les activités proprement physiques où la machine, plus rapide et endurante, a surclassé facilement les humains. À présent, ce sont nos activités cognitives mêmes qui sont l'objet de l'invasion du numérique.

Cette perspective est effrayante car, au-delà du mythe apocalyptique d'une machine qui prendrait le pouvoir, elle nous confronte à la possibilité obsédante que nous ne soyons que des machines évoluées. Que resterait-il de notre humanité s'il était démontré que tout en nous pouvait être « algorithmisé » ?

En première approche, l'intelligence artificielle paraît attaquer le cœur même de notre créativité. Par exemple, un logiciel tel que *OMax* est capable d'improvisation musicale. Mais, à bien y regarder, cette intelligence artificielle ne fait jamais qu'« à la façon de ». Si, par sa rapidité de calcul, par sa capacité à convoquer des bases de données gigantesques, la machine peut optimiser les acquis de la culture humaine, il reste à l'humanité l'exploration de l'inconnu dans tous les domaines : sciences, arts, etc.

L'histoire imaginée par des robots ressemblerait à un cercle ; celle conçue par les humains aurait plus la figure d'une spirale évolutive et erratique. Pour prendre un autre exemple, l'une des caractéristiques de notre cerveau est sa capacité à faire un choix en partie indécidable sur une base objectivement rationnelle entre deux univers possibles contradictoires (comme : Dois-je porter mon pull rouge ou bleu aujourd'hui ?). Cette tâche d'arbitrage ne peut être l'objet d'un algorithme.

Il n'est donc pas certain que cette avancée des machines nous dépouille de notre humanité. Au contraire, sans doute nous encouragera-t-elle à utiliser ce que nous avons de plus spécifiquement humain, en nous libérant de tout ce qui peut être automatisé. Ainsi, la question se pose : Et si l'invasion des robots nous rendait plus humains ? Le plus inquiétant est de savoir s'il existe un modèle économique et social qui supporterait une telle libération.

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



LA MARCHÉ DES SCIENCES

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



AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
14H - 15H



Réchauffement climatique

La carte des vins redessinée ?

Kimberly Nicholas

Le changement climatique modifie les caractères des vins produits dans les terroirs. En Californie et ailleurs, les producteurs de vins sont déjà confrontés à la nécessité d'adapter leurs vignobles et leurs pratiques.

L'ESSENTIEL

La température de l'air augmente dans les vignobles, ce qui change la composition du vin.

Plus alcooliques, moins acides, voire moins tanniques... : les grands crus risquent de perdre certains des caractères qui ont fait leur célébrité.

Déjà, les viticulteurs s'adaptent en faisant évoluer leurs pratiques agronomiques et œnologiques.

« Il fait chaud dans une vigne ! Couverte de poussière, je prélevais des grappes pour mes recherches à propos de l'influence de la température et de la luminosité sur le raisin, quand la vue d'un cep m'arrêta net. Dans cette parcelle située à Carneros, dans la vallée de Sonoma en Californie, il n'y aurait pas dû y avoir autre chose que du pinot noir. Et voilà que je tombais sur des ceps de... cabernet franc, de petit verdot, de syrah, de malbec, de sauvignon blanc... »

J'eus l'explication quelque temps plus tard quand je tombais sur Ned Hill, à la tête du vignoble incorporant la parcelle où j'avais fait ma découverte. « C'est un essai que je mène, m'expliqua-t-il. Je n'ai aucune raison pour le moment de changer de cépage. Toutefois, il commence à faire chaud ici pour le pinot noir, alors je teste des variétés de climat plus chaud. »

Le changement climatique a un impact sur la vigne, donc sur le vin. Que faire pour qu'un pinot noir californien ou bourguignon conserve son bouquet caractéristique ? Des vignobles millénaires sont-ils sur le point d'être remplacés par de nouveaux ? La réponse va dépendre de l'ampleur du changement climatique et... de l'innovation viticole et œnologique.

La région où les vallées de Sonoma et de Napa se joignent avant de déboucher dans la baie de San Francisco est dotée d'un microclimat frais adapté à la culture du pinot noir. Pour autant, si les températures continuent à augmenter, ce cépage pourrait cesser d'être cultivable dans les terroirs qui l'ont accueilli en Amérique, et les vigneron nord-californiens devront passer à la culture du cabernet, voire de la syrah. Un cépage est une variété de



Vitis vinifera, c'est-à-dire de vigne à vin. Le changement climatique commence à modifier la biologie des vignes là où on les cultive traditionnellement, et cela pourrait altérer les caractères qui font les vins du monde entier. Les amateurs risquent-ils de ne plus reconnaître leurs vins préférés ?

Du pinot à Fresno ?

Quand ils travaillent à adapter des céréales ou d'autres plantes nourricières au changement climatique, les agronomes se concentrent surtout sur les effets du réchauffement de l'atmosphère sur les rendements. Et dans le cas de la vigne ? Pour faire produire des crus de qualité à cette plante, on restreint volontairement son rendement, de sorte que c'est la qualité du raisin qui change avec le climat.

Dans la viticulture visant de gros volumes, qui, en Californie, existe par exemple à Fresno, le réchauffement climatique change peu de choses. En revanche, il menace les grands crus que l'on cultive à 320 kilomètres plus au Nord, sur les terres plus fraîches des environs de San Francisco. Là, des ouvriers agricoles qualifiés prennent soin de chaque cep une dizaine de fois par an. Ils essaient ainsi de gagner en qualité même si que l'on perd en quantité. Une vigne ne disposant que de ressources restreintes emploie en effet ces dernières dans les quelques grappes qui lui sont possibles, où elle concentre saveurs et arômes.

À Fresno, où la température est en moyenne de 2,5 °C plus élevée qu'à Napa, on vise plutôt la production de masse. Même si elle semble faible, la différence de température entre Fresno et Napa a

des énormes conséquences sur la valeur et la nature des raisins. Notamment, elle rend impossible la culture de pinot à Fresno.

La température régule la vie de toute plante, donc de la vigne. Celle-ci, du reste, est tellement influencée par son environnement que les Français ont créé un mot pour le désigner : *terroir*. Comme le café et d'autres produits végétaux, le vin reflète son terroir. Le sucre que produit la vigne grâce à la photosynthèse est modifié puis, selon les conditions locales, recombinaison en une multitude de composés. Les odeurs de framboise, de banane ou d'herbe fraîche que vous appréciez tant dans votre verre, ce sont eux. La température, mais aussi l'humidité, la lumière et le sol lui-même exercent leur influence sur ce ballet chimique. En fin de compte, un vin contient quelque 80 % d'eau, 12 à 15 % d'alcool et pas plus de 5 %



PHOTO: J. M. TOUZARD / AGF

LES VITICULTEURS LUTENT CONTRE LA HAUSSE DE LA TEMPÉRATURE ATMOSPHERIQUE MOYENNE en réorientant les rangs de leurs vignes en travers de la course solaire et en taillant leurs ceps pour que les feuilles entourent les grappes et leur fassent plus d'ombre.

l'autres constituants. Cet « extrait sec », toutefois, fait tout son caractère.

Faire du vin est clairement affaire de compétence. Pour autant, tous les vignerons que je connais pensent que la qualité d'un vin provient avant tout de son terroir. « Quand tout est bien fait dans le vignoble, mon travail consiste juste à ne rien gâcher », m'a joliment résumé un vigneron californien. Un grand vin se cultive ; il ne se fabrique pas.

Or les conditions climatiques ont une triple influence sur la vigne : elles jouent sur le climat de sa région (son macroclimat), sur son mésoclimat – à l'échelle de la parcelle –, et sur le « microclimat » auquel sont soumises les grappes au sein du feuillage. Le macroclimat détermine les précipitations et les températures, et par là module le cycle végétatif. Comme les températures contrôlent le réveil des vignes après l'hiver, puis leur croissance et leur mûrissement, elles dictent quelles variétés sont adaptées au lieu considéré et à son climat. Il existe des milliers de variétés, dont certaines sont adaptées à la fraîcheur allemande et d'autres à la chaleur extrême des longs étés espagnols...

Du fait du lent réchauffement de l'atmosphère terrestre, de nouvelles régions – le Sud de l'Angleterre notamment – s'ouvrent à la viticulture, tandis que d'autres, certaines parties de l'Australie par exemple, luttent contre les sécheresses fréquentes et de forts degrés alcooliques défavorables à l'équilibre des arômes. L'évolution des pluies et des périodes de précipitations altère la qualité des raisins de diverses façons. Une humidité excessive favorise les champignons de la vigne – mildiou et oïdium. Même compensée par l'irrigation, la sécheresse stresse

les plantes. Mes recherches montrent que les rendements baissent en cas de sécheresse, même quand on arrose les vignes (voir l'entretien avec Jean-Marc Touzard, page 34).

L'influence du mésoclimat régnant dans un vignoble commence par ces composantes de base de la saveur d'un vin que sont ses sucres et ses acides, véritables yin et yang du vin. Au cours du mûrissement, un phénomène entièrement contrôlé par la température, la chaleur élève le taux de sucre de 1 ou 2 % par semaine. Les fruits accumulent donc des sucres, au point que les raisins mûrs contiennent un quart de leur poids en sucres (deux fois plus que dans une pêche mûre!).

Degrés en plus.

anthocyanes en moins

Ensuite, à la cave, la fermentation convertit les sucres en alcool. Ainsi, plus les raisins sont sucrés, plus les vins qu'ils donnent sont alcoolisés. La lente montée de la température moyenne de l'atmosphère produit donc une augmentation mondiale du degré des vins. Or les degrés d'alcool élevés s'accompagnent d'une impression brûlante et amère, qui peut empêcher de percevoir les saveurs subtiles ou les altérer.

Quant aux acides, ils sont très présents dans les raisins immatures (une tactique de défense de la plante), puis ils sont partiellement dégradés au cours du mûrissement. Leur effet principal est de conférer au vin de la fraîcheur. Dans des régions viticoles froides, les viticulteurs emploient des variétés qui, tout en mûrissant vite pendant la brève période végétative, produisent une acidité plaisante, c'est-à-dire

modérée. Si la température moyenne continue à s'élever, les vins produits sous les climats frais aujourd'hui, tel le riesling alsacien (et allemand), pourraient perdre leur fraîcheur, puisque la chaleur dégrade l'acidité (voir l'entretien avec Jean-Philippe Gervais, page 32).

Outre les sucres et les acides, d'autres molécules rares jouent un rôle important dans le vin. Parmi elles, les tanins sont des composés phénoliques dont le nom provient de leur usage pour conserver les peaux. Ce sont les tanins qui font l'essentiel de la couleur du vin, laquelle oriente fortement nos sensations lorsque nous en buvons. Les tanins proviennent de la peau et des pépins du raisin, et non pas de son jus, en général blanc (sauf dans quelques cépages dits « teinturiers »).

Selon que l'on produit des vins rosés ou rouges, on laisse macérer les peaux dans le jus pendant une nuit ou une semaine. Outre des tanins, la peau transfère au jus des anthocyanes, composés phénoliques très répandus dans la nature puisqu'ils pigmentent les baies, les violettes, les aubergines, etc. Initialement moins concentrés en anthocyanes, les jus de raisins blancs sont séparés des peaux dès l'arrivée en cave. Même si la formation de ces composés phénoliques dépend avant tout de l'exposition au soleil, on constate que la couleur des vins de climats chauds est souvent moins intense que souhaitée. Les études suggèrent que la température atmosphérique moyenne n'est pas le seul paramètre qui influe sur la production d'anthocyanes : le franchissement de certains seuils de température conduirait à une diminution sensible des teneurs en anthocyanes.

Le mésoclimat de la parcelle joue aussi sur la texture du vin due aux tanins : une caractéristique que l'on décrit en employant des termes tels que « charpenté », « soyeux », « râpeux »... En bouche, les tanins se lient aux protéines de la salive, ce qui a pour effet de dessécher la langue et les gencives et, ainsi, d'altérer la perception des saveurs. Un vin ayant un bon équilibre tannique permet de mieux savourer les aliments, car les tanins nettoient le palais et éliminent les graisses fixées sur les récepteurs gustatifs, ce qui fait ressortir le goût de chaque bouchée. Or trop de lumière ou de chaleur réduit les tanins et altère l'équilibre du vin.

Nous en arrivons maintenant aux composés présents à l'état de traces. Leur rôle n'est pas négligeable. Ils confèrent au vin sa singularité, tout particulièrement celle de son parfum. Lorsque nous goûtons un vin, nous commençons souvent par le faire tourner au fond du verre. Cette action volatilise les arômes, et nous les humons.

Parmi ces arômes figurent aussi les composés présents à l'état de traces, lesquels, en allant se fixer sur nos récepteurs olfactifs, participent à l'impression produite. Situés dans notre nez, ces récepteurs envoient des signaux au cerveau, qui intégrera de nombreuses informations sensorielles pour produire une impression aromatique complète. Le « goût », pour sa plus grande part, provient ainsi de l'odorat.

Taux de sucres ou taux d'arômes ?

Nous savons que les composés aromatiques présents à l'état de traces apparaissent dans le raisin sous l'influence de la température durant les derniers stades du mûrissement. Nommé « mûrissement de la saveur », ce phénomène se produit à une vitesse différente de celle du mûrissement des sucres. Or, traditionnellement, on démarre la vendange en fonction du

L'AUTEUR

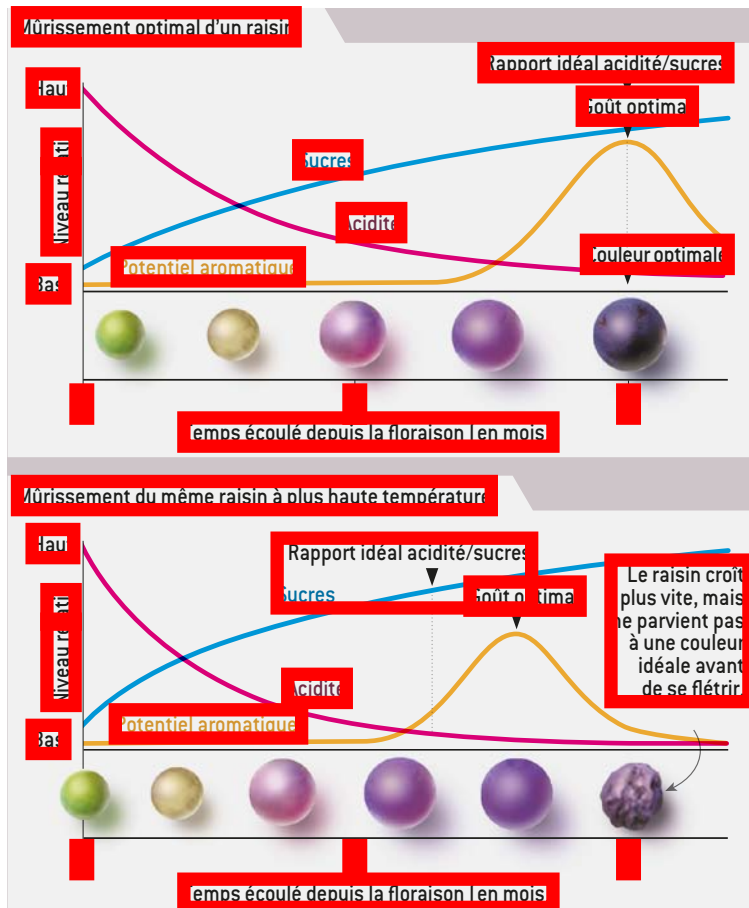


Kimberly NICHOLAS est maître de conférences en science de la soutenabilité à l'Université de Lund, en Suède. D'origine californienne, elle conseille les vignerons et producteurs de vin dans le monde entier.

DECIDER DE LA DATE DES VENDANGES DEVIENDRA DE PLUS EN PLUS DIFFICILE

Fixer la date des vendanges a toujours été difficile, puisqu'il faut plusieurs mois au raisin pour mûrir. Au cours du mûrissement, le taux de sucres augmente dans les baies (*courbe bleue*) tandis que celui des acides diminue (*courbe rouge*). Le rapport idéal entre sucres et acides est atteint au bout de quatre mois de mûrissement environ. Par ailleurs, le potentiel aromatique produit par les très nombreux composés aromatiques atteint son optimum à peu près au même moment, de sorte que la fenêtre idéale pour lancer les vendanges est très étroite.

A l'avenir, fixer la date des vendanges pourrait devenir de plus en plus difficile, car le rapport optimal des taux d'acides et de sucres pourrait être atteint plus tôt dans la saison, avant que le potentiel aromatique – lui aussi atteint plus tôt – ne le soit. Dès lors, les vendanges devront démarrer à des périodes différentes selon que l'on privilégie plutôt les arômes ou plutôt le rapport acidité/sucres. L'atmosphère se réchauffant, les raisins pourraient aussi mûrir trop vite pour accumuler assez de potentiel aromatique (*le pic orange est moins élevé*) ou pour acquérir une couleur plaisante à la dégustation.



aux de sucres. Mais aujourd'hui, certains viticulteurs lancent leur vendange en fonction de la présence des saveurs que la vinification révélera.

De leur côté, les chercheurs essaient de mieux comprendre l'influence sur la perception gustative du millier de composés aromatiques ou plus que contiennent le vin. C'est en effet difficile à prédire, car un nombre de ces composés sont présents à de très faibles concentrations, tandis que la sensibilité humaine à une substance chimique varie d'un facteur 100 à 1 000 d'une personne à l'autre... Plus de 200 composés contribuent par exemple

au goût de fraise, de sorte qu'en fonction de la sensibilité olfactive de chacun, telle personne le percevra, tandis qu'une autre ne le percevra pas.

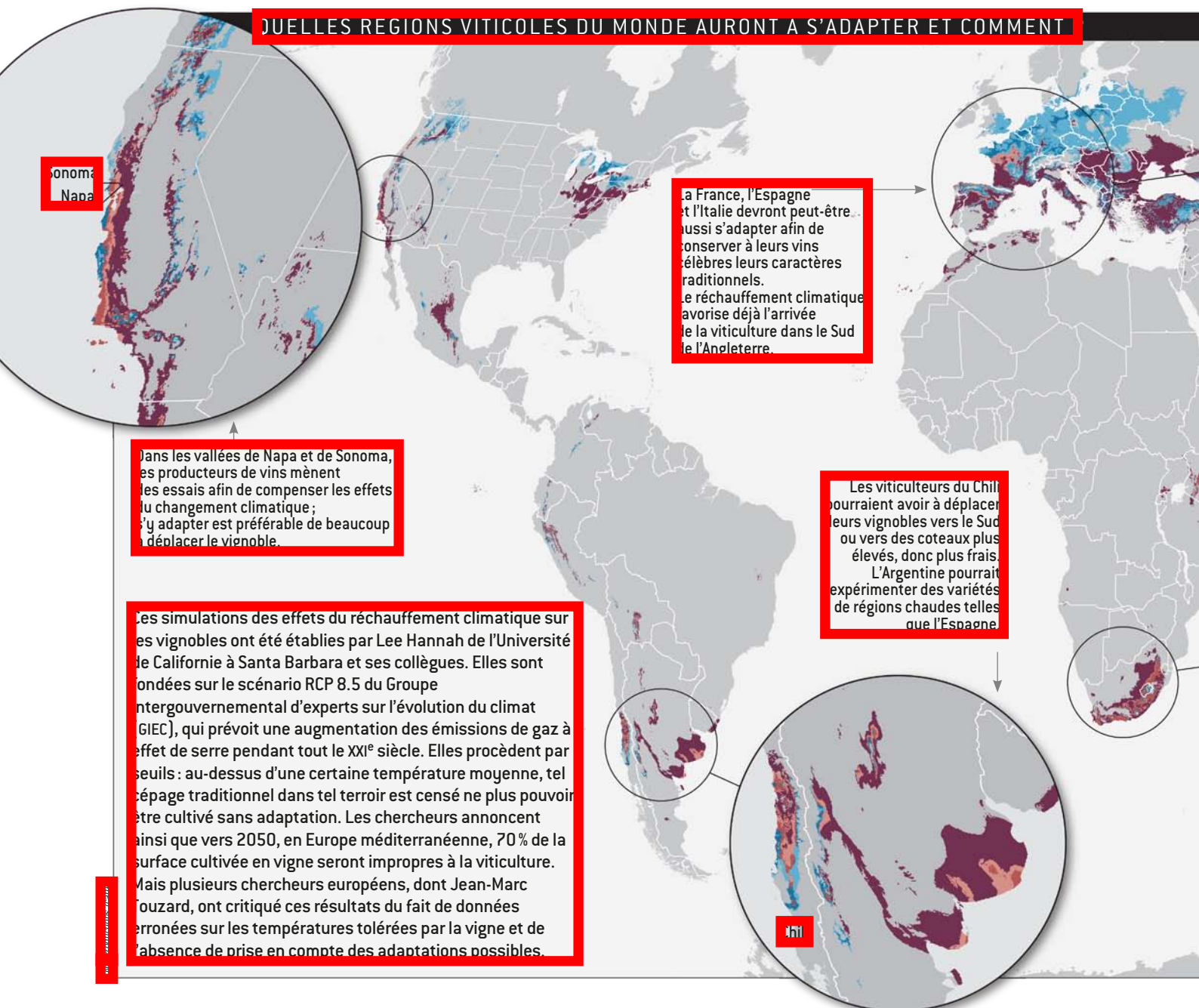
Comment les vignerons commencent à s'adapter

Que peut faire un vigneron pour s'adapter au changement climatique ? Une stratégie envisageable est de tenter de faire migrer progressivement son vignoble vers les zones les plus favorables de son terroir, par exemple en plantant ses nouvelles vignes sur un coteau frais plutôt que dans

une vallée chaude. Toutefois, déplacer un vignoble n'a rien de facile et prend du temps. En outre, les viticulteurs sont très liés à leurs terres, qu'ils connaissent et cultivent souvent depuis des générations, de sorte qu'ils n'envisagent pas une seconde de les quitter.

Une stratégie plus naturelle pour les vignerons est la sélection de vignes adaptées au nouveau climat. Depuis que la vigne à vin, *Vitis vinifera*, a été domestiquée, il y a des millénaires, les viticulteurs ont sélectionné des milliers de variétés dotées de traits différents et adaptées à des terroirs divers. Choisir une variété prometteuse de

QUELLES REGIONS VITICOLES DU MONDE AURONT À S'ADAPTER ET COMMENT



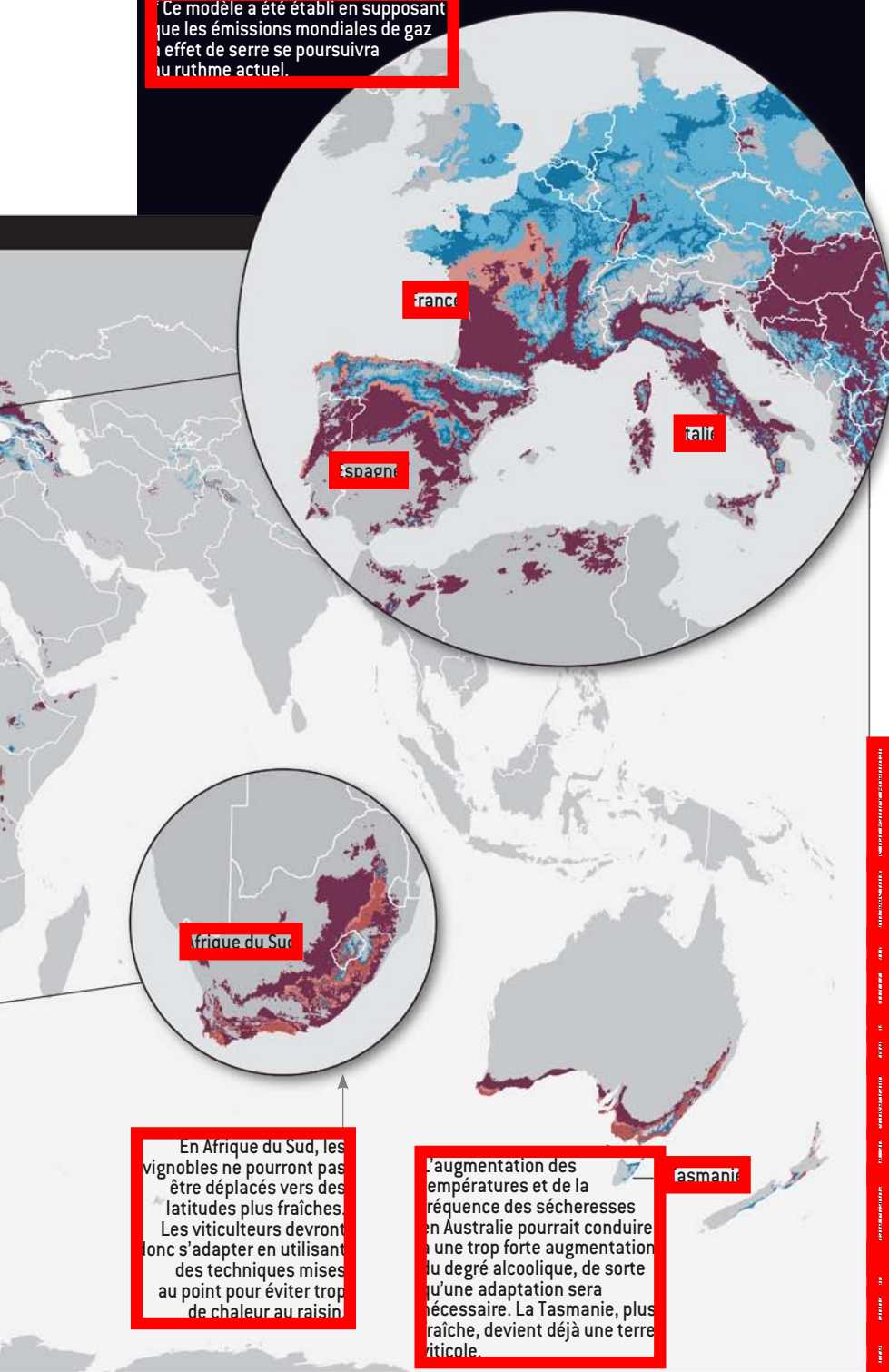
Besoins d'adaptation des régions viticoles actuelles d'ici 2050

- Très probable nécessité d'une adaptation des vignobles
- Probable nécessité d'une adaptation des vignobles
- Improbable nécessité d'une adaptation des vignobles

Nouvelles régions viticoles d'ici 2050

- Très probablement
- Probablement

Ce modèle a été établi en supposant que les émissions mondiales de gaz à effet de serre se poursuivra au rythme actuel.



En Afrique du Sud, les vignobles ne pourront pas être déplacés vers des latitudes plus fraîches. Les viticulteurs devront donc s'adapter en utilisant des techniques mises au point pour éviter trop de chaleur au raisin.

L'augmentation des températures et de la fréquence des sécheresses en Australie pourrait conduire à une trop forte augmentation du degré alcoolique, de sorte qu'une adaptation sera nécessaire. La Tasmanie, plus fraîche, devient déjà une terre viticole.

par ses caractéristiques pour l'implanter là où elle n'a pas encore poussé a toutefois de grandes chances de ne pas produire le résultat escompté...

Le pinot noir, par exemple, a été sélectionné pour sa vitesse de maturation dans le frais climat bourguignon. Cette variété a été implantée en Californie, où elle se retrouve sous un climat plus chaud. Étant donné leur mûrissement rapide, les pinots noirs californiens ne reproduisent pas toujours le mélange aromatique bourguignon, si apprécié. La plantation de variétés de pays aux climats plus comparables avec le climat californien, telle l'Espagne, pourrait sans doute produire de meilleurs résultats, mais les essais correspondants dureront des années...

La mise au point de variétés de vigne résistant à l'augmentation des températures est bien plus difficile que la mise au point de variétés de céréale ayant la même résistance. En effet, après une décennie ou plus de création d'une nouvelle variété, il reste à vérifier qu'elle peut être cultivée dans tel ou tel terroir, ce qui demande des années d'expérimentations.

Mesures agronomiques

Les vignerons luttent aussi contre le changement climatique par des mesures agronomiques. Lors d'une nouvelle plantation, ils peuvent par exemple réorienter les rangs afin d'augmenter l'ombre que se font mutuellement les vignes. Une taille adaptée des jeunes ceps de vigne pendant la croissance pourra aussi produire plus de feuillage, qui offrira plus d'ombre aux raisins. L'emploi de toiles anti-grêle et autres tentures peut aussi servir à créer un ombrage utile pour retarder la maturation. La greffe d'une variété traditionnelle sur un porte-greffe (un pied de vigne) issue d'une autre variété mieux adaptée (surgreffage) est aussi une stratégie possible. La décision de greffer, toutefois, ne se prend en général qu'au début du long cycle de culture.

Les vignerons peuvent jouer sur les conditions très locales régnant autour du raisin de façon à mieux conserver les composés importants. Les mesures que j'ai effectuées à la surface de filets anti-grêle protégeant plus de 500 pieds de vigne dans la région de Carneros ont révélé une luminosité triple de celle qui avait été précédemment publiée. Or ces vignes sont palissées verticalement, c'est-à-dire que

La Bourgogne a résisté à la chaleur et fera face au réchauffement

Jean-Philippe Gervais, directeur technique du Bureau interprofessionnel des vins de Bourgogne (BIVB), nous décrit l'impact du changement climatique en Bourgogne.

POUR LA SCIENCE

Partout en France, les vendanges démarrent plus tôt, le degré alcoolique croît et les arômes changent. Tout va bien en Bourgogne ?

JEAN-PHILIPPE GERVAIS : Tout va bien ! Pour parler clairement : s'agissant des pinots noirs de Bourgogne, jusqu'à aujourd'hui, on peut se réjouir du changement climatique. Nous récoltons des raisins plus mûrs, chose dont on sait qu'elle est difficile à obtenir dans un contexte septentrional.

PLS

Les vins ont donc aussi changé pour d'autres raisons que le changement climatique ?

J.-P. G. : Effectivement, notre meilleure compréhension des déterminants de la qualité a permis de gommer un certain nombre de défauts. Ainsi, on connaît bien désormais les facteurs cultureux et œnologiques favorables à l'obtention de grands crus. En Bourgogne, il est certain que l'on a beaucoup moins ces vins un peu dilués, maigres.

PLS

Mais comment ces cépages septentrionaux supportent-ils les années très chaudes ?

J.-P. G. : Prenons l'exemple de notre millésime le plus chaud en 20 ans : 2003. Quand on goûte les vins de cette année-là, on retrouve toujours la fraîcheur que l'on attend normalement des bourgognes. Cela signifie que les vignerons ont su s'adapter à ce millésime chaud et réussi à conserver leur caractère frais. Or l'année pouvait sembler dramatique aux vignerons. « Si toutes les années sont comme cela, comment allons-nous faire ? ». Ils pouvaient-ils se demander. L'expérience montre qu'ils ont réussi à tenir le choc.

conduite des macérations, afin de tenir compte de la composition particulière des raisins.

PLS

Que fera-t-on quand ces pratiques ne suffiront plus ?

J.-P. G. : Les raisins actuels sont produits avec un matériel végétal qui a été choisi il y a 10 ou 30 ans, quand on sélectionnait les cépages en fonction de



Jean-Philippe GERVAIS,
Bureau interprofessionnel
des vins de Bourgogne.

LE TERROIR BOURGUIGNON a une physionomie bien à lui qui est familière aux amateurs de bourgognes du monde entier.



PLS

Le réchauffement climatique a-t-il donc amélioré le bourgogne ?

J.-P. G. : Oui ! Cependant, il faut faire attention aux mots que l'on utilise. On a toujours fait de grands vins en Bourgogne, sauf que le profil de ceux que l'on fait aujourd'hui n'est plus celui de ceux que l'on faisait dans les années 1960. Par là, je pense notamment à la couleur. Les vins actuels ont beaucoup plus de couleur. À chaque époque, on a fait des vins répondant à une certaine esthétique, correspondant à un certain potentiel de ce que l'on peut exprimer.

acides... mais on a toujours autant de diversité.

PLS

Pourquoi ?

J.-P. G. : Parce que la Bourgogne n'est pas plantée que de quelques clones, mais d'un très grand nombre de pieds de pinot de souches différentes. Je suis ainsi frappé de voir que sur les terroirs d'appellation, par exemple l'appellation Vosne-Romanée, il existe une très grande variété de styles de vins, qui sont tous de très haute qualité, mais de styles différents.

PLS

Comment ont-ils fait ? Ont-ils vendangé à maturité et ainsi obtenu des degrés trop élevés ?

J.-P. G. : Non, car ils ont justement évité la surmaturité. Les gens ont été très surpris, car les vendanges ont démarré pendant les vacances d'été. Il y a eu une accélération de la maturation en août et, pour ne pas se retrouver dans des situations de surmaturité, il fallait récolter les raisins vite. Les vignerons ont donc vendangé la nuit pour avoir les meilleures conditions de température et ont adapté leur vinification, notamment la

richesse en sucre. Demain, on choisira le matériel végétal en fonction du réchauffement climatique, qui va certainement continuer. Nous avons eu la chance : dans la famille des pinots, il y a une diversité énorme. Vous avez des vignes avec des raisins de petite taille, des grappes lâches, des aptitudes plus ou moins importantes à la production de sucres... Un mauvais plant aujourd'hui, parce qu'il ne produit pas assez de sucres, sera peut-être un très bon plant dans 50, 100 ou 200 ans.

*Propos recueillis
par François SAVATIER*

es sarments et leur feuillage sont fixés sur des fils de fer au-dessus du raisin afin de réduire les maladies fongiques, grâce à une ventilation accrue. Toutefois, selon les études que j'ai menées avec des collègues de l'Université Stanford et de celle de Californie à Davis, chaque pourcentage d'augmentation de la luminosité signifie 2 % en moins d'anthocyanes et de tanins! Dès lors, étant donné l'augmentation des températures, ne vaudrait-il pas mieux réduire le palissage vertical afin d'augmenter l'ombre du feuillage sur les grappes?

Mesures œnologiques

Les vignerons peuvent aussi essayer de compenser les effets du réchauffement climatique par des mesures œnologiques. Si les acides se perdent trop vite lorsque la région se réchauffe, ils peuvent en ajouter en cours de vinification. Si les raisins accumulent trop de sucre, donnant un trop fort degré alcoolique, l'emploi de l'osmose inverse ou d'une autre technique leur permettra de retirer l'excédent d'alcool. Ces options sont toutefois limitées, et elles ne suffiront jamais à rétablir exactement un mélange traditionnel d'arômes.

Tirer le meilleur du raisin est un métier qui requiert des années de dur labeur. Pour certains spécialistes de la filière du vin, les régions viticoles du Nouveau Monde, telle les vallées de Napa et de Sonoma, sont encore en train de créer leurs bons terroirs. Pour autant, peut-on se demander, l'expérience déjà accumulée pendant plusieurs générations n'est-elle pas en train d'être réduite à néant par le changement climatique?

«J'ai ouvert une bouteille de notre vin et il sentait comme un Carneros», m'a dit récemment Debby Zygielbaum, qui travaille au sein du vignoble Robert Sinskey dans la vallée de Napa. Un Napa sentant le Carneros? C'est problématique, car tant les Napa que les Carneros ont déjà leurs amateurs, qui savent bien ce qu'ils boivent...

Même si le réchauffement climatique est sans doute en train d'améliorer les vins produits dans les régions fraîches, telle la Tasmanie ou encore la Bourgogne, les changements à venir risquent de perturber nombre de vignobles célèbres baignés par des climats plus chauds. En Californie, par exemple, il suffirait d'après mes calculs d'un réchauffement printanier de plus de 1,6 °C pour que les rendements chutent. Il semble que les consommateurs l'aient



COMME TOUS LES VINS ROUGES, celui de Robert Sinskey, dans la vallée de Napa en Californie, est produit en maintenant assez longtemps les peaux des grains de raisin en contact avec le jus pour en extraire le plus possible de couleur et de tanins.

déjà compris: les cours du pinot noir de Californie baissent dès que la température moyenne durant le mûrissement dépasse un certain seuil...

Nous avons vu que les vignerons disposent de moyens techniques pour adapter leurs vignobles au changement climatique, mais suffiront-ils? Tout d'abord, il y a des limites biologiques à ce que l'on peut faire; ensuite, si l'usage de techniques de correction devait trop s'intensifier, les vins deviendraient des produits «fabriqués» plutôt que des produits de terroir...

Si l'humanité persiste dans son comportement actuel, la température terrestre moyenne va augmenter de 2,6 à 4,8 °C pendant les vies des prochaines générations. Cette augmentation peut sembler modeste, mais la limite inférieure de cet intervalle correspond à la différence de température moyenne entre Napa et Fresno, tandis que la limite supérieure correspond à la différence entre la ville viticole de Lodi, dans la vallée centrale de la Californie, et Houston au Texas... Bien que les viticulteurs soient pleins de ressources et très créatifs, l'idée de faire pousser du raisin dans le climat texan est choquante.

Nous sommes en train de perturber profondément la nature, donc la vigne. Si nous ne changeons pas vite nos comportements, le goût perdu des vins de ma région natale ne représentera que l'une des conséquences les moins graves du changement climatique...

BIBLIOGRAPHIE

L. Hannah *et al.*, *Climate change, wine, and conservation*, *PNAS*, vol. 110(17), pp. 6907-6912, 2013.

J. van Leeuwen *et al.*, *Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050*, *PNAS*, vol. 110(33), pp. E3051-E3052, 2013.

Hervé Quenol, *Changement climatique et terroirs viticoles*, Lavoisier, 2014.

K. A. Nicholas et W. H. Durham, *Farm-scale adaptation and vulnerability to environmental stresses: insights from winegrowing in northern California*, *Global Environmental Change*, vol. 22(2), pp. 483-494, 2012.

À ÉCOUTER

Le jeudi 7 mai 2015, de 14h à 15h, l'économiste Jean-Marc Touzard, de l'Inra, viendra sur l'adaptation des vignes au changement climatique dans la partie *Actualités* de l'émission *La marche des sciences* sur France Culture. www.franceculture.com

« Avec 4 °C de plus, la carte du vignoble français explose ! »

Entretien avec Jean-Marc Touzard

Quel est l'impact du réchauffement climatique sur le vignoble français, et comment ce dernier s'adapte-t-il ? L'éclairage de Jean-Marc Touzard, l'un des coordonnateurs du programme de l'Inra pour l'adaptation de la vigne au climat futur.



POUR LA SCIENCE Le réchauffement climatique met-il le vignoble français en danger ?

JEAN-MARC TOUZARD : Si l'on suit et atteint l'objectif vertueux fixé pour la *Conférence Paris Climat* (COP 21, fin 2015) de ne pas dépasser une hausse de la température moyenne de 2 °C, nos vignerons parviendront à s'adapter. En revanche, avec un réchauffement de 3 à 4 °C avant la fin du siècle, les raisins seront mûrs en été à des températures jusqu'à 7 °C plus élevées dans certaines régions, et la carte du vignoble français explose !

PLS Quel est, aujourd'hui, l'impact du changement climatique ?

J.-M. T. : On observe partout une accélération du cycle végétatif, qui, depuis les années 1960, a avancé les vendanges de deux à trois semaines vers l'été. C'est énorme ! Conséquence : une augmentation du taux de sucres dans le raisin et donc du degré alcoolique. Pour l'instant, ce serait plutôt un atout : dans les régions où l'on avait du mal à récolter à maturité, on y arrive désormais. Résultat, il y a aujourd'hui davantage

de bons millésimes dans le Bordelais ou en Bourgogne. Il n'y a guère que dans le Sud qu'une certaine saturation alcoolique du vin devient problématique...

PLS Les vins du Nord profitent donc du réchauffement climatique ?

J.-M. T. : Oui, s'agissant des sucres et de l'alcool, mais pas des acides du raisin, très sensibles au surcroît de lumière et de chaleur : on constate une baisse générale de l'acidité du vin. Comme l'identité des vins septentrionaux est liée à leur acidité, notamment celle des vins blancs, c'est une difficulté sérieuse. Dans les vins blancs alsaciens, le problème est bien identifié, tout comme en Champagne, où l'on peut toutefois corriger en jouant sur l'assemblage des vins.

PLS Ainsi, le réchauffement déséquilibre le vin ?

J.-M. T. : Comme l'explique Kimberly Nicholas dans son article, il change la façon d'obtenir cet équilibre, voire, dans certains cas, l'empêche. La recherche de l'équilibre des vins est compliquée par le déphasage des cinétiques de

certaines molécules très sensibles à des paramètres climatiques fins, tels certains terpènes, thiols et autres polyphénols. Leur présence ou absence modifie les composantes aromatiques. Dans les rouges bordelais, on a observé en 2003, année de canicules, une tendance à passer d'arômes de fruits frais (mûre, framboise...) à des arômes de fruits cuits (figue, cassis...). Quant à la baisse des tanins provoquée par l'élévation des températures sur certains cépages de rouge – le grenache par exemple – elle peut entraîner des pertes de couleur. L'équilibre du vin s'obtient en ajustant différents paramètres : sucre, alcool, acidité, structure tannique, arômes. Le réchauffement climatique modifie l'évolution des uns par rapport aux autres au cours de la maturation.

PLS Comment les vignerons s'adaptent-ils ?

J.-M. T. : Par toute une combinaison de mesures, dont la nature dépend des conditions locales. Un point crucial est que le réchauffement climatique implique des problèmes d'eau. Des sécheresses estivales plus fréquentes et plus marquées se produiront, surtout au Sud. Combinées

avec des températures moyennes plus élevées, elles entraîneront des carences hydriques, pouvant bloquer les processus de maturation, voire, à l'extrême, faire mourir des pieds de vigne. Les viticulteurs devront trouver quelles nouvelles pratiques culturales conviennent pour chaque terroir, et retrouver de meilleurs rendements malgré le manque d'eau.

Cette nécessité est déjà forte en Languedoc, alors qu'en Champagne par exemple, on peut au contraire gagner en rendement par rapport au passé. En Languedoc, dans le Var, etc. on se met à l'irrigation, désormais plus facile à mettre en œuvre légalement, y compris pour les AOC; dans d'autres régions où l'hygro-métrie se maintient malgré la chaleur, c'est le développement des maladies telles que l'oïdium ou le mildiou qui devient plus problématique.

PLS

Quelles sont les innovations techniques sur lesquelles les viticulteurs s'appuient ?

J.-M. T. : Les viticulteurs adoptent des techniques venues d'autres vignobles ou de la recherche, et les ajustent à leurs terroirs. L'étude fine des terroirs révèle l'existence d'une diversité de sols et de températures, diversité qui peut être mise à profit pour repenser la localisation des cépages et des techniques, par exemple en plantant des vignes plus en altitude. Outre cette optimisation locale, les jeunes entreprises comme Fruition Sciences, à Montpellier, développent des outils d'aide à la décision pour une irrigation de précision, afin d'économiser l'eau. Dans le cadre du gros projet *Aqua Domitia*, on prépare en Languedoc l'irrigation de 4000 hectares avec l'eau du Rhône. À l'Inra, nous travaillons aussi à la récupération des eaux des stations d'épuration pour irriguer les vignes.

D'autres innovations sont possibles à l'échelle de la parcelle, par exemple en amendant les sols, en essayant de nouvelles tailles qui produisent plus de feuillage au-dessus des grappes, en plantant des arbres fruitiers dans les vignes, en les protégeant du soleil par des filets anti-grêle, etc. Un producteur catalan a même installé des panneaux photovoltaïques au-dessus de ses vignes...

Il y a ensuite l'adaptation œnologique. Les machines à vendanger

L'Inra teste les vins du futur

Pour s'adapter au changement climatique, les viticulteurs ont besoin de savoir si les vins plus alcooliques, moins acides et dotés de nouveaux arômes seront acceptés ou pas par les consommateurs. L'Inra s'en préoccupe déjà et teste les réactions des consommateurs aux « vins du changement climatique ». « Il importe par exemple de savoir si l'évolution des bordeaux vers des arômes de fruits cuits, plutôt que de fruits frais comme c'est le cas aujourd'hui, est acceptée par les consommateurs, ou s'il faudra corriger pour maintenir les caractéristiques actuelles de ces vins », explique Jean-Marc Touzard.

« Mon collègue Eric Giraud-Méraud et son doctorant Alejandro Fuentes ont ainsi testé la réaction du public à des vins ayant 15 °C d'alcool, moins d'acidité, provenant de raisins surmûris... mais aussi corrigés par désalcoolisation ou acidification. »

Quels sont les premiers résultats ? Dans le cas des bordeaux par exemple, on constate que les consommateurs peu experts préfèrent dans un premier temps les vins du changement climatique, mais saturent plus vite qu'avec les vins actuels. Les connaisseurs, eux, tendent à résister aux vins nouveaux ou corrigés. Des expériences similaires viennent d'être menées avec des blancs et des rouges du Languedoc, et l'étude se poursuit.

facilitent la récolte de nuit, ce qui permet d'éviter les températures trop élevées et l'oxydation prématurée des raisins. Par ailleurs, des corrections œnologiques permettent de désalcooliser le vin – en utilisant par exemple l'osmose inverse et des membranes – ou de l'acidifier en retirant des cations par électrolyse.

PLS

Pourquoi a-t-on recours au génie génétique ?

J.-M. T. : Nous ne travaillons pas pour mettre des OGM dans les vignes, mais la génomique permet de repérer et de marquer les gènes intéressants, par exemple pour l'adaptation à la sécheresse, puis d'accélérer les processus de sélection ou de création de variétés. Il ne s'agit pas de manipulations génétiques.

PLS

Comment alors accélère-t-on cette sélection ?

J.-M. T. : Nous disposons d'au moins 2300 cépages de la vigne du vin (*Vitis vinifera*) que nous pouvons croiser, et d'autres espèces du genre *Vitis* avec lesquelles on peut créer des hybrides mieux adaptés au réchauffement climatique. À l'Inra, nous avons accéléré l'étude du matériel végétal en mettant au point des outils de phénotypage à haut débit de jeunes vignes, en suivant le comportement de pousses installées sur des tapis roulants, afin de les observer de façon quasi automatique avant de trier les données d'observation à grande vitesse.

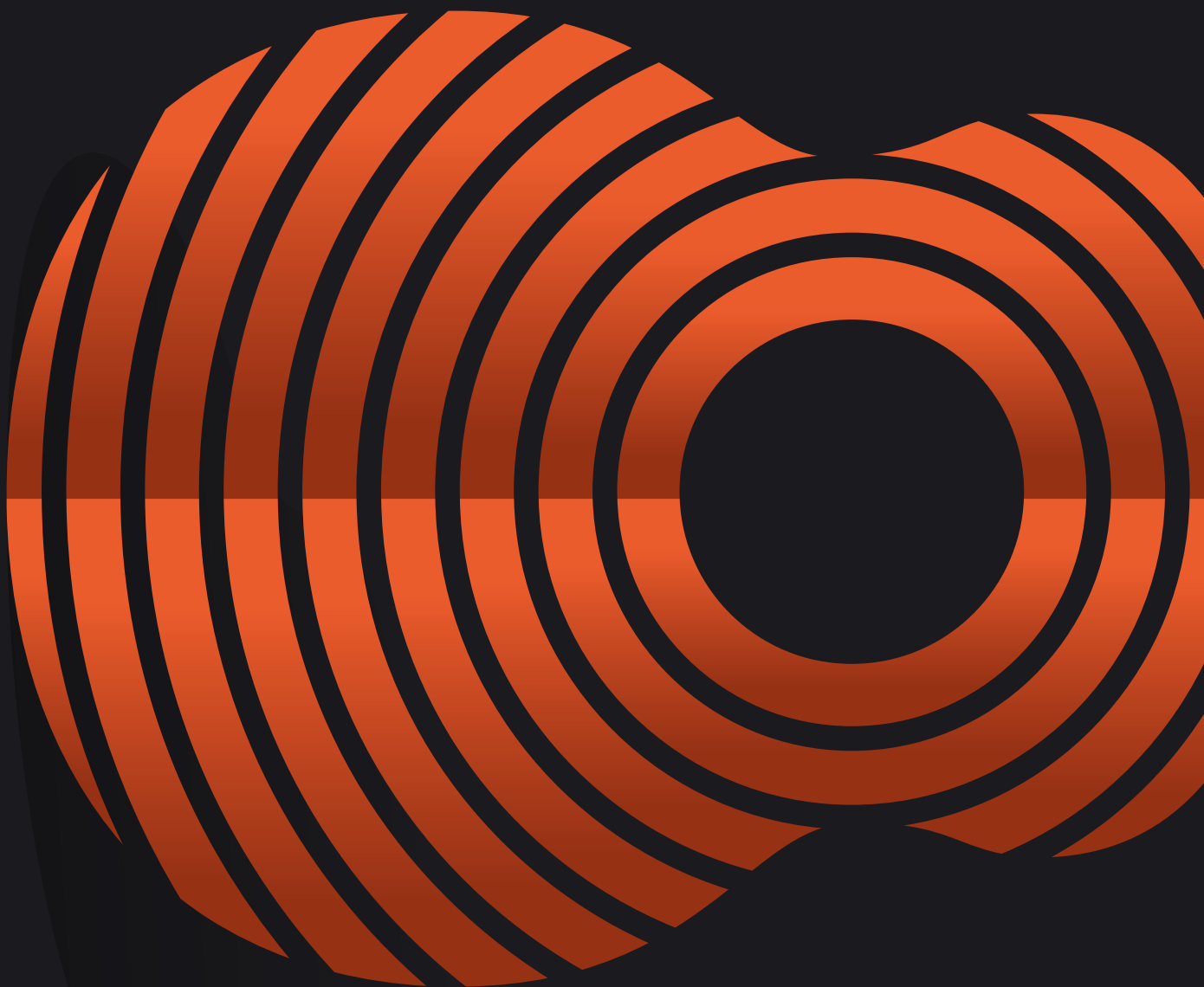
Comme on a déjà créé des variétés résistantes aux maladies, on en recherche qui supportent mieux le stress hydrique, qui sont plus tardives ou moins productives en sucre, etc. Une certaine expérience de l'introduction de nouveaux cépages existe déjà : le marselan, créé en 1961 par l'Inra en croisant du cabernet sauvignon et du grenache noir, a été introduit en Languedoc, dans la vallée du Rhône, en Espagne, dans le Nord de la Californie, en Suisse et en Israël. Son introduction réussie dans plusieurs vignobles illustre ce que nous pourrions faire en sélectionnant des variétés adaptées au changement climatique, si le besoin s'en fait sentir.

Propos recueillis
par François SAVATIER

L'holographie

un nouvel outil

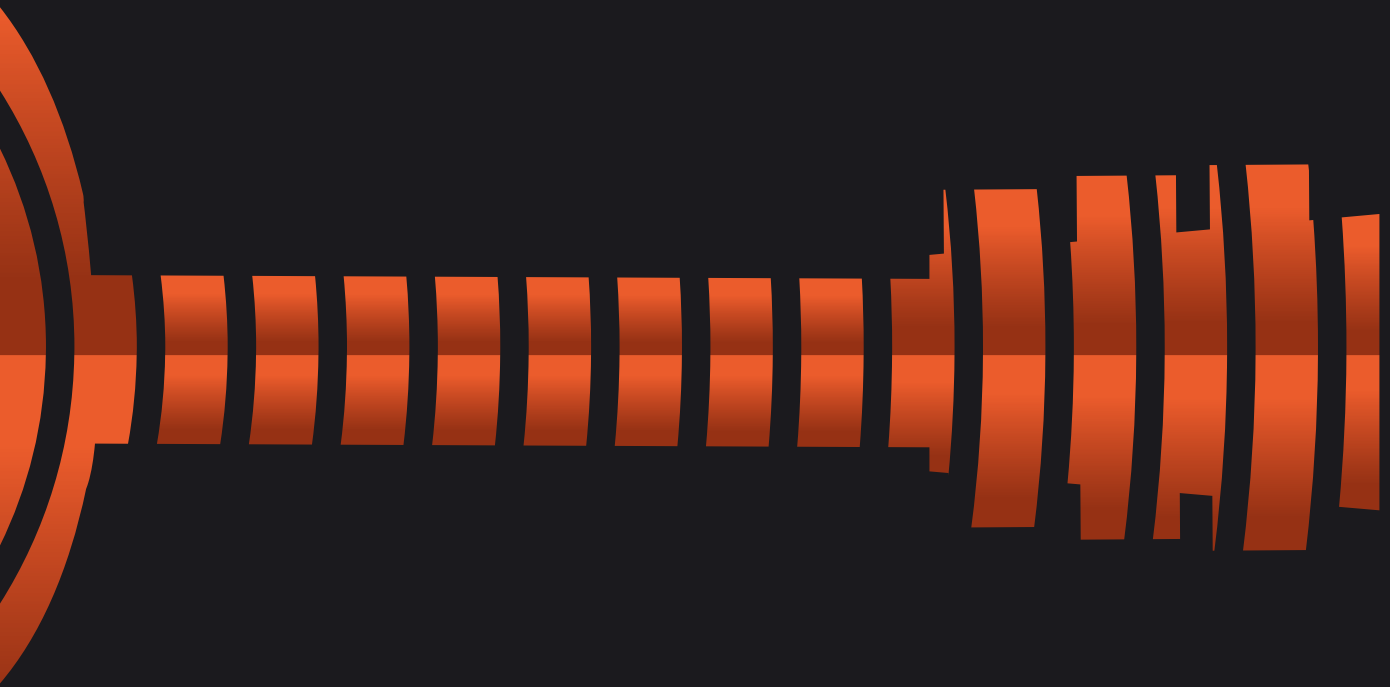
J. Bertin, L. Daudet, R. Gribonval et F. Ollivie



acoustique

pour les luthiers

Lorsqu'il fabrique un instrument, le luthier le peaufine en écoutant les sons que ses vibrations produisent. Une nouvelle technique d'analyse et de visualisation des vibrations lui faciliterait la tâche.



Loc toc toc ! En frappant à la porte, on la fait vibrer. Le mouvement, imperceptible à l'œil nu, crée dans l'air environnant une alternance de surpressions et de dépressions locales qui se propagent à 340 mètres par seconde et atteignent nos oreilles. La vibration engendre ainsi une onde sonore, c'est-à-dire un « son ». Les caractéristiques de l'onde conditionnent en grande partie le son perçu. Par exemple, la fréquence d'oscillation de l'onde détermine si le son est aigu ou grave. Les différents paramètres physiques de l'objet vibrant, tels sa forme et le matériau dont il est fait, régissent la vibration. Ainsi, nous distinguons les yeux fermés un objet en verre d'un autre en bois au simple son qu'ils produisent lorsqu'on les frappe.

Il en va de même pour la table d'harmonie d'une guitare, d'un violon ou d'un piano. Mise en vibration grâce aux cordes, elle est la source principale du son de l'instrument, comme la membrane d'un haut-parleur ou la peau d'un tambour. La table d'harmonie de l'instrument étant un objet tridimensionnel complexe, sa vibration est riche et ne produit pas une fréquence unique, mais tout un ensemble de fréquences. Celles-ci sont caractéristiques d'un instrument : c'est pourquoi le son d'une guitare se distingue de celui d'un piano, même quand on y joue la même note.

Lors de la fabrication de l'instrument, l'art du luthier consiste, pour une part, à optimiser les modes de vibrations de la table d'harmonie, pour en obtenir le son qu'il attend. L'artisan intervient alors sur la forme de la table, les matériaux qui la composent et les « barrages » (des baguettes de bois raidisseuses placées sous la table). Le luthier est capable d'identifier à l'oreille le bon accordage de la table ; son savoir-faire le guide pour obtenir le son désiré.

Cependant, il pourrait lui être utile de visualiser les formes vibratoires de la table (on parle aussi de ses « modes ») qui se manifestent à une fréquence précise. Il aurait alors une connaissance objective des caractéristiques vibratoires impliquées dans le son de l'instrument.

Pour parvenir à cette identification, des dispositifs existent, mais ils sont chers, complexes et difficiles à mettre en place. Est-il possible de développer un outil performant et utilisable par le luthier ? Avec des collègues acousticiens, mathématiciens et informaticiens, nous avons utilisé une

LES AUTEURS

Nancy BERTIN est chargée de recherche CNRS à l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (Irisa) de Rennes.

Laurent DAUDET est professeur à l'Institut Langevin de l'Université Paris-Diderot.

Rémi GRIBONVAL est directeur de recherche Inria à l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (Irisa) de Rennes.

François OLLIVIER est maître de conférences à l'Institut d'Alembert de l'Université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris.

L'ESSENTIEL

Les luthiers s'appuient sur un savoir-faire traditionnel pour évaluer le son des instruments qu'ils perçoivent et accordent à l'oreille.

Des systèmes de mesure des vibrations existent pour compléter ce savoir-faire, mais ils sont lourds et coûteux.

Des chercheurs ont développé une technique de visualisation rapide et fiable des modes de vibration : l'holographie compressée.

Cette technique associe des outils récents de plusieurs disciplines : mathématiques, informatique, acoustique et traitement du signal.

technique novatrice de traitement du signal, l'« holographie acoustique compressée », pour visualiser rapidement et de façon fiable les vibrations d'un instrument de musique. La procédure consiste en plusieurs étapes : enregistrer le son de l'instrument, identifier les fréquences auxquelles il vibre et, pour chacune d'elles, analyser le champ acoustique pour reconstruire la forme vibratoire associée.

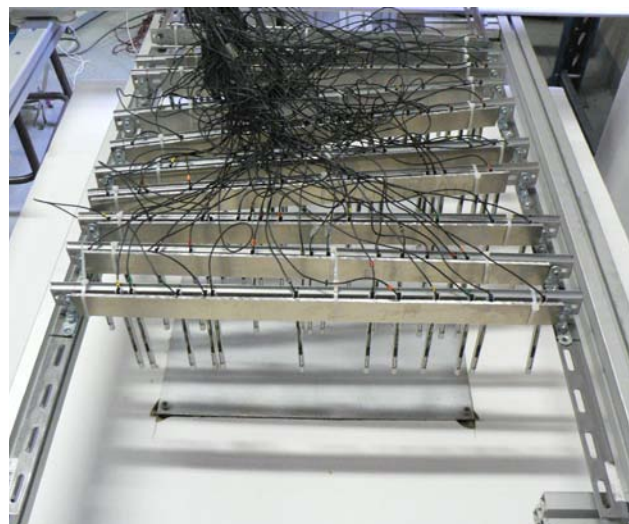
Pour le luthier, voir la forme vibratoire de la table d'harmonie serait une aide afin de l'accorder avant son assemblage, par exemple en optimisant la position des barrages pour renforcer ou atténuer certaines vibrations.

Le phénomène de vibration est complexe, car il dépend de nombreuses caractéristiques physiques et géométriques de la structure. Cependant, des résultats classiques de mécanique montrent que l'on peut décomposer la vibration d'une structure en une somme – une « superposition » – de vibrations élémentaires, nommées « modes propres » (voir l'encadré page 40), chacune étant associée à une fréquence spécifique.

Pour visualiser et identifier les modes propres d'une structure vibrante, deux moyens sont couramment utilisés : le calcul numérique et l'analyse expérimentale. La modélisation numérique est assez facile à mettre en œuvre, mais les résultats qu'elle produit dépendent de paramètres souvent mal maîtrisés, tels que les propriétés élastiques des matériaux (d'une grande variabilité en lutherie) et la nature de la liaison entre la table d'harmonie et son support. C'est pourquoi la méthode expérimentale est la plus adaptée pour mesurer directement la vibration et en identifier les modes propres. Comment procéder ?

Voir les vibrations, un problème ancien

Les premières études sur les vibrations et leur visualisation remontent aux travaux des physiciens allemands Ernst Chladni (1756-1827) et August Kundt (1839-1894). Le premier a étudié cette question en saupoudrant des plaques de métal avec de fines particules de poussière (voir page 43). Depuis, de nombreux progrès ont été réalisés dans ce domaine et l'industrie utilise couramment des systèmes de visualisation des vibrations à des fins de diagnostic en mécanique des structures. Les vibrations sont en effet source de



bruit, mais aussi de contraintes mécaniques susceptibles de fragiliser et de détériorer les objets. Dans ce contexte, visualiser les vibrations permet de les comprendre pour mieux les supprimer.

Pour les visualiser, il existe une méthode très précise, mais coûteuse : la vibrométrie laser à balayage. Ce capteur scanne la structure vibrante avec un faisceau laser. Le principe est le même que celui des radars de contrôle routier. En vertu de l'effet Doppler-Fizeau, la structure en mouvement engendre un décalage de fréquence du faisceau laser réfléchi. La mesure de la différence de fréquence permet ainsi de calculer la vitesse de la vibration au point visé.

À l'issue du balayage, le champ vibratoire étant entièrement mesuré, une méthode d'analyse mathématique – l'analyse modale – est mise en œuvre pour identifier les fréquences propres et les modes propres associés.

Des méthodes précises et coûteuses

Mesurer la vitesse en un point prend plusieurs secondes. Ainsi, le balayage de la table avec un maillage centimétrique nécessite plusieurs heures (typiquement plus de huit heures pour une structure d'environ un mètre carré). En outre, la mise en œuvre de la vibrométrie laser nécessite un matériel lourd et coûteux (le prix d'une très belle voiture de sport!).

En 2006, une équipe de chercheurs américains a utilisé cette technique pour étudier trois violons anciens d'une valeur inestimable. La prouesse est remarquable,

mais la méthode reste inaccessible au luthier dans son travail quotidien.

Il existe une autre façon d'obtenir une carte des vibrations de la table d'harmonie. Observons le geste du luthier : il tapote la planche de bois et écoute le son résultant. La vibration est trop rapide et d'amplitude trop faible pour qu'il puisse l'observer à l'œil nu. C'est bien son oreille, un extraordinaire instrument d'analyse du son, qui le guide. L'holographie acoustique de champ proche s'inspire de la technique du luthier : écouter le son produit, reconstituer la carte des vibrations, l'analyser et visualiser les modes propres.

Cette technique a été proposée au début des années 1980 par le physicien Julian Maynard, de l'Université d'État de Pennsylvanie, et ses collègues. Elle fait appel à un ensemble de microphones constituant une « antenne » acoustique. Celle-ci est disposée à quelques centimètres de la structure, que l'on fait vibrer à l'aide d'un coup de marteau contrôlé, comme pour la vibrométrie laser. Tous les micros de l'antenne enregistrent simultanément l'onde sonore produite, depuis leurs positions respectives. En utilisant un modèle mathématique de propagation de l'onde, on remonte le temps en effectuant numériquement la propagation du son « à l'envers » – la rétropropagation – jusqu'à déterminer les vibrations de la table d'harmonie de l'instrument qui ont créé le son.

Le principe de cette opération acoustique est analogue à celui de l'holographie optique, dans la mesure où l'image enregistrée dans un plan et un modèle de propagation de la lumière permettent

L'ECOUTE DES VIBRATIONS.

Des microphones sont disposés au-dessus de l'instrument (à gauche) ou de la plaque de métal (à droite) dont on veut étudier les vibrations. Grâce aux modèles de propagation du son, l'enregistrement permet de reconstituer la carte des vibrations de l'objet. Pour la plaque rectangulaire, de forme régulière, un positionnement aléatoire des microphones est plus efficace. Pour la guitare, dont la table d'harmonie a une forme complexe, une disposition régulière des microphones suffit.

P our comprendre comment les chercheurs analysent les vibrations de la table d'harmonie de la guitare, il faut

acoustiques. Commençons avec le cas simple d'un objet suspendu à un ressort, qui présente une fréquence d'oscillation naturelle.

Cette fréquence est proportionnelle à la racine carrée de k/m , où m est la masse de l'objet et k est la raideur du ressort, qui mesure sa résistance à l'étirement. Si l'objet est déplacé de sa position au repos, par un choc par exemple, il entre dans un mouvement oscillant à cette fréquence, ce qu'on nomme le mode propre et la fréquence propre.

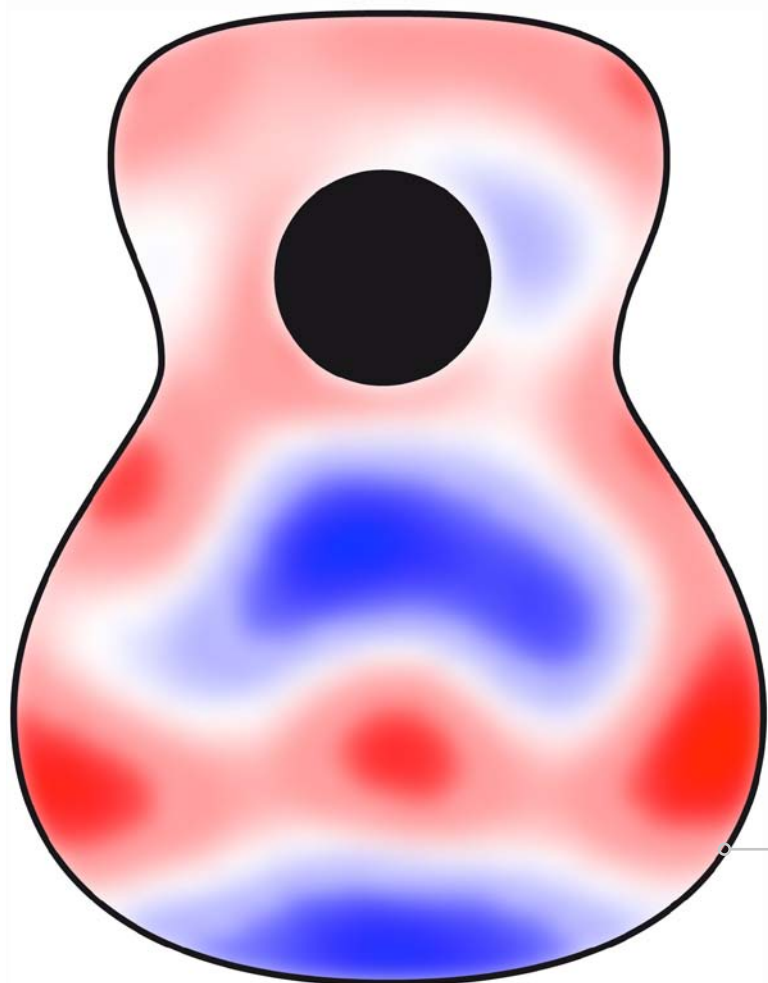
Lorsque l'objet qui vibre a une structure complexe, chacun de ses points oscille d'une façon différente. On établit une carte des vibrations. Mais celle-ci est difficile à exploiter directement. L'étude des ondes nous indique que la vibration d'une structure, telle la table d'harmonie de la guitare, est une somme, ou superposition, de plusieurs modes propres. Chaque mode propre est caractérisé par une fréquence et une certaine répartition (fixe) des nœuds et ventres de vibration, et intervient avec un certain coefficient de pondération dans la vibration globale. Les fréquences et les modes propres dépendent de la masse et de l'élasticité de la structure, de sa géométrie et de la façon dont elle est liée à son support. Il y a donc une grande variabilité d'une guitare à une autre.

Ainsi, pour étudier les vibrations d'une guitare, les acousticiens cherchent à décomposer le signal en modes propres. Le son est enregistré puis analysé par des techniques d'« imagerie acoustique », ou d'« analyse modale », pour produire une représentation visuelle du mode associé à chaque fréquence propre.

Dans la technique utilisée par les auteurs, l'enregistrement du son, plus rapide que dans les autres techniques, ne suffit pas à reconstruire une carte assez précise des vibrations pour déterminer les modes propres. La stratégie consiste alors à utiliser le fait qu'un mode propre se décompose à son tour en une somme d'ondes planes. Ces dernières sont des ondes élémentaires idéales, dont le front d'onde (l'ensemble des points de l'espace dont l'état vibratoire est exactement le même) est un plan infini et perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

Tout l'art de la méthode réside dans la détermination des ondes planes qui seront utiles pour reproduire les vibrations de la guitare.

Carte des vibrations



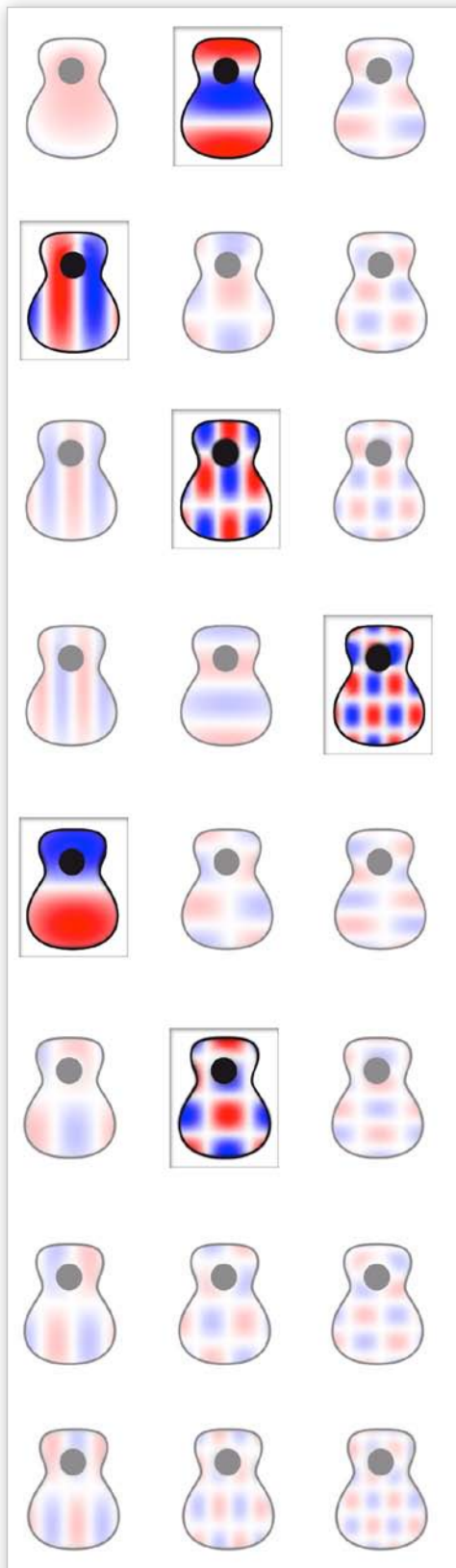
LA TABLE D'HARMONIE DE LA GUITARE vibre lorsqu'on la frappe avec un petit marteau ou que les cordes de guitare oscillent [ci-dessus]. Les déformations élastiques de la table sont indiquées par les couleurs. Une impulsion, tel un coup de marteau, excite tous les modes propres pouvant contribuer à la vibration de la guitare. La vibration d'une seule corde n'excite qu'une partie d'entre eux.

LES MODES PROPRES (au centre) participent à la vibration de la table d'harmonie, mais les contributions de chaque mode diffèrent en intensité. La réponse acoustique d'un instrument donné est unique, car de nombreux paramètres physiques de la structure interviennent.

CHACUN MODE PROPRE se décompose en une somme de plusieurs ondes planes (à droite), qui sont des objets mathématiques. Dans l'approche des auteurs, un algorithme sélectionne des ondes planes dans un catalogue comprenant un grand nombre de ces objets. La superposition de ces ondes doit reproduire la table des vibrations obtenues grâce à l'enregistrement des microphones. Le processus est répété pour réduire le nombre d'ondes planes nécessaires. Ici, les ondes planes en surimpression (à droite) contribuent au troisième mode propre (au centre).

Modes propres

Catalogue d'ondes planes



de connaître l'image dans un autre plan, sans la mesurer directement. Dans le cas de l'holographie acoustique, l'enregistrement sonore est notre « hologramme ». Comme pour la vibrométrie, une fois déterminé le champ vibratoire de la table d'harmonie, il est possible de retrouver les fréquences propres et les modes de vibration de l'instrument.

Dans la perspective d'assister le luthier, la méthode est séduisante : le microphone est un outil répandu, d'usage simple et assez peu coûteux. Il est en outre relativement aisé d'assembler quelques dizaines de micros pour fabriquer une antenne. On utilise couramment ce type d'instrument en imagerie acoustique, par exemple dans l'industrie automobile pour localiser les sources de bruit vers l'extérieur ou dans l'habitacle des véhicules.

Cependant, pour le luthier, le nombre de micros afin d'acquérir un hologramme suffisamment bien défini est un obstacle. Généralement, plusieurs centaines de micros sont nécessaires, ce qui est prohibitif.

Multiplier les mesures

Une solution alternative consiste à utiliser une antenne portant un nombre plus raisonnable de micros et à répéter la mesure pour différentes positions : on simule ainsi une antenne plus dense. Dans l'une des premières expériences que nous avons réalisées, une antenne de 120 micros a été déplacée en 16 positions afin d'obtenir un niveau de détail suffisant pour la structure testée : une plaque plane et rectangulaire. Les 120 mesures, répétées sur 16 positions, ont produit en une quinzaine de minutes un hologramme à 1 920 points à partir duquel nous avons effectué la rétropropagation numérique et identifié les modes propres.

Le dispositif est beaucoup moins coûteux qu'un vibromètre laser, mais sa mise en œuvre reste trop délicate pour un usage courant. Il faut reproduire à l'identique le coup de marteau pour chaque mesure, car la reconstruction des vibrations à partir de l'hologramme y est très sensible. Pourrait-on se passer des manipulations supplémentaires et faire l'acquisition des signaux utiles en une seule opération ?

Avec une seule mesure sur chacun des 120 microphones, il n'est pas possible de reconstruire le champ de vibration avec assez de précision pour déterminer les modes propres. Le système est dit

Échantillonnage compressé et parcimonie

Pour comprendre le principe de l'échantillonnage compressé, commençons par une analogie simple : le jeu de la Bataille navale, que nous

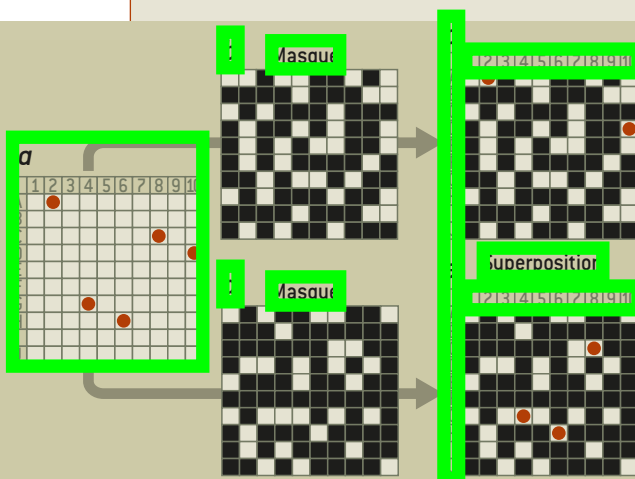
bateaux n'occupent qu'une seule case chacun, dans une grille de 10×10 .

Le but du jeu est de retrouver la position de tous les bateaux ennemis en posant le minimum de questions, chacune testant une case à la fois : A7 ? F4 ? On s'aperçoit vite que cette façon de sonder l'ensemble de la grille n'est pas très efficace : presque tous les coups « tombent à l'eau » et, en fin de compte, il ne faudra pas beaucoup moins de

questions, certes de façon imparfaite, sur l'ensemble de la grille. Nous utilisons alors des méthodes liées aux nombres aléatoires. Par exemple, construisons un « masque binaire », de même taille 10×10 que la grille, avec autant de cases opaques que de cases transparentes, réparties aléatoirement (voir ci-dessous). Les nouvelles questions

apport à la taille de la grille : seules 5% des cases sont occupées. En mathématiques, cette propriété est nommée la parcimonie : un objet complexe (telle une grille de Bataille navale) peut être décrit comme la somme d'un très petit nombre d'objets élémentaires.

D'une façon générale, la théorie de l'échantillonnage compressé, développée il y a une dizaine d'années, décrit comment acquérir le plus efficacement possible des données complexes, sachant qu'elles vérifient la propriété de parcimonie. Dans le cas de l'holographie



DANS UNE BATAILLE NAVALE simplifiée avec cinq bateaux noirs sur une grille (a), tester chaque case l'une après l'autre n'est pas la meilleure stratégie. On gagne en efficacité si on teste par ligne ou par colonne la présence d'un bateau et on recoupe les informations. On est d'autant plus performant en utilisant des masques non réguliers (b et d). Chacun fournit un certain nombre d'informations (c et e). On retrouve la position de tous les navires avec quelques masques.

100 questions pour finir la partie (en moyenne, il faut 34 questions).

Pour être plus efficace – en faisant abstraction des règles du jeu ! –, il faut que chaque question nous enseigne simultanément sur plusieurs positions spatiales : par exemple, « y a-t-il au moins un bateau sur la colonne D ? Sur la ligne 7 ? » C'est mieux, car on a ainsi des chances d'éliminer toute une série de cases en une seule question.

L'étape suivante est de poser une question qui nous

enseignent : « A travers ce masque, combien peut-on voir de bateaux ? Et à travers cet autre masque ? » Avec une vingtaine de ces masques et les réponses correspondantes, un petit programme numérique permet que quelques secondes pour retrouver entièrement la grille de l'adversaire. Le nombre de « questions » a été divisé par quatre ! La performance n'est cependant pas toujours au rendez-vous. Cela ne fonctionne ici que parce que le nombre de bateaux est faible par

rapport à la taille de la grille : seules 5% des cases sont occupées. En mathématiques, cette propriété est nommée la parcimonie : un objet complexe (telle une grille de Bataille navale) peut être décrit comme la somme d'un très petit nombre d'objets élémentaires. D'une façon générale, la théorie de l'échantillonnage compressé, développée il y a une dizaine d'années, décrit comment acquérir le plus efficacement possible des données complexes, sachant qu'elles vérifient la propriété de parcimonie. Dans le cas de l'holographie

– N. B., L. D., R. G. et F. O.

sous-échantillonné. Cependant, on peut compenser cette lacune en apportant une connaissance *a priori* de la vibration de la structure. C'est ici que la conjonction de compétences en physique, mathématiques et informatique se révèle décisive.

Il nous faut revenir ici à la notion de modes propres. La vibration, au premier abord complexe, peut s'expliquer comme la superposition de ces modes, chacun d'eux se manifestant à une fréquence dite de résonance et chacun ayant un coefficient de pondération. Ce premier niveau de décomposition est d'ailleurs utilisé dans les techniques d'imagerie classique précédemment évoquées. Le résultat qu'elles produisent n'est pas une image unique de la vibration, mais une série d'images de chacun de ses modes propres, dont la superposition constitue la vibration totale.

Compléter l'information avec des ondes planes

Un mode propre peut, à son tour, être décomposé en formes plus simples : des ondes planes. L'onde plane est une onde « théorique », associée à une seule fréquence et se propageant dans une seule direction ; elle ne peut exister que dans un milieu infini. Mathématiquement parlant, c'est une solution élémentaire de l'équation des ondes – équation qui régit l'évolution de la pression acoustique dans l'espace et le temps. Il existe une infinité d'ondes planes, qui diffèrent par leur longueur d'onde et leur direction de propagation. Or on montre mathématiquement que la combinaison de quelques éléments seulement de cet ensemble infini suffit pour reconstituer un mode propre avec précision. Identifier un mode propre revient donc à déterminer les quelques ondes planes principales qui le composent.

Finalement, il y a deux niveaux de décomposition. Au niveau mécanique, la vibration est d'abord considérée comme la superposition de certains modes propres. Puis, au niveau mathématique, chaque mode propre est lui-même modélisé comme la somme « parcimonieuse », c'est-à-dire d'un nombre réduit, d'ondes planes. Dans le cas de la table d'harmonie d'une guitare, une dizaine d'ondes planes suffisent.

La stratégie adoptée consiste à déterminer les ondes planes qui, d'après cette double décomposition, participent à la vibration de la table d'harmonie, uniquement à

partir de ce que mesurent en une fois les 120 microphones de l'antenne. La théorie du traitement du signal nous assure qu'il est possible de reconstruire le champ vibratoire avec une précision comparable à celle de la vibrométrie laser et de l'holographie acoustique classique. Cela est faisable grâce au caractère parcimonieux en ondes planes des modes propres de vibration. Si les ondes planes pertinentes avaient été nombreuses, 120 mesures auraient été insuffisantes pour contraindre correctement les combinaisons possibles. Ainsi, la combinaison la plus parcimonieuse d'ondes planes nous donne accès au champ vibratoire de la table d'harmonie, et par suite aux modes propres. Cette approche est nommée «holographie acoustique compressée», en référence à une technique mathématique récente également appliquée en imagerie médicale ou en radioastronomie: l'échantillonnage compressé (voir l'encadré page 42). Le calcul de la combinaison optimale (la plus parcimonieuse) d'ondes planes repose sur des algorithmes d'optimisation numérique qui, bien que complexes, sont à la portée des ordinateurs de bureau actuels.

Figures de Chladni

Le physicien allemand Ernst Chladni (1756-1827) a étudié les vibrations de plaques en les frottant avec un archet. Dans une version moderne de l'expérience, un haut-parleur crée des vibrations. Une poudre fine dispersée sur la plaque permet de les visualiser: elle se déplace et forme des motifs (ci-dessous) en se concentrant aux nœuds de vibration (les régions où l'amplitude de vibration est nulle). Le motif dépend du mode de vibration.



Comment détermine-t-on les ondes planes qui composent la vibration de l'instrument de musique? En théorie, le nombre d'ondes planes possibles est infini, la direction et la longueur d'onde pouvant prendre n'importe quelles valeurs. Comme cela n'est pas gérable dans un programme numérique, nous utilisons un catalogue fini d'ondes planes, avec des valeurs discrètes de direction et de longueur d'onde (de l'ordre d'une centaine d'ondes planes). L'échantillonnage compressé permet de sélectionner rapidement un certain nombre d'ondes planes dont la combinaison reproduit correctement les 120 mesures.

Le principe de parcimonie est crucial dans l'algorithme utilisé. Le programme cherche à minimiser le nombre d'ondes nécessaires pour reproduire le signal enregistré. La combinaison la plus parcimonieuse d'ondes planes nous donne accès au champ vibratoire de la table d'harmonie. À partir de là, nous pouvons calculer les modes propres.

Reste une question: comment disposer les 120 microphones de l'antenne? De façon un peu contre-intuitive, les algorithmes

Palais DÉCOUVERTE

les conférences

La lumière dévoile l'univers

Cycle de 4 conférences

6 mai La première lueur de l'Univers avec Karim Benabed

20 mai Aux sources de la lumière avec David Elbaz

27 mai La tapisserie lumineuse avec Valérie de Lapparent

3 juin Les noirs de l'Univers avec Daniel Kunth

entrée libre dans la limite des places disponibles

HEMA La science en voyage

programme complet sur palais-decouverte.fr

avec soutien de SCIENCE CIEL ESPACE culture plus

compressés fonctionnent mieux lorsque la répartition des microphones de l'antenne est irrégulière, ou bien lorsque la forme de la structure vibrante est elle-même complexe, comme c'est le cas de la table d'harmonie d'une guitare (voir la figure page 39). Pour quelle raison ?

Quelques dizaines de micros, dans le désordre

Les ondes ont une structure périodique. Ainsi, si nous répartissons les microphones de façon régulière, nous risquons d'avoir une redondance dans l'information et ne pas en avoir assez pour reconstruire correctement la carte des vibrations. Il faut répartir de façon aléatoire les microphones pour maximiser l'information de l'hologramme. Lorsque la surface est régulière, nous plaçons en pratique les microphones de façon irrégulière, mais raisonnable par rapport aux contraintes physiques de la structure de l'antenne et nous vérifions que l'information enregistrée sera suffisante. En revanche, si la surface vibrante est de forme irrégulière, l'information est maximisée

BIBLIOGRAPHIE

S. Chardon *et al.*, Nearfield acoustic holography using sparsity and compressive sampling principles, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 132, 1521, 2012

J. Bardos, Les ondes, entre physique et mathématiques, *Pour la Science*, n° 409, novembre 2011

SUR LE WEB

J. Espiau de Lamaestre *et al.*, Écouter pour voir, sur le site de la revue numérique *Interstices* : <https://interstices.info/jcms/i-27453/ecouter-pour-voir>

même avec un placement régulier de micros. Ce principe, dit d'incohérence, est crucial pour que l'algorithme de reconstruction parcimonieuse fonctionne bien ; il impose donc des contraintes lors de l'enregistrement du son. Il explique également pourquoi les grilles de sélection de la Bataille navale sont complexes et aléatoires (voir l'encadré page 42).

Dans le cas d'une table d'harmonie de guitare, le résultat de l'holographie compressée est excellent : avec une antenne de quelques dizaines de micros et une seule mesure, les modes de vibration sont parfaitement identifiés. Ainsi, en « transférant » une partie de la complexité depuis le matériel vers le logiciel, nous obtenons une technique rapide (deux secondes pour l'acquisition, quelques minutes de calcul), peu onéreuse (moins de micros, possibilité dans un futur très proche d'utiliser des micros numériques similaires à ceux des téléphones portables, très peu coûteux) et simple à mettre en place.

Reste à savoir si la technique sera adoptée dans le monde de la lutherie, et plus largement par celui de l'imagerie acoustique...



LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

{ Partagez les savoirs }

UN CHERCHEUR / UN LIVRE

Lundi 11 mai - 18h : Le Secret de l'Archéobélodon
J.-G. Michard, A. Mille, P. Tassy, Belin-MNHN, 144p.).

Lundi 18 mai - 18h : À la découverte des araignées
A. Canard, C. Rollard, Dunod-MNHN, 192p.).

Sur la piste des mammifères sauvages
P. Haffner, A. Savouré-Soubelet, Dunod-MNHN, 208p.).

FILMS

Vendredi 16 mai - 15h30 : Monsieur Fabre
Réal. : H. Diamant-Berger (1951, 88').

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 31 mai - 15h : Mammalogiste
Spécialiste des petits mammifères carnivores, G. Vernon

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

Au Jardin des Plantes

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

BAR DES SCIENCES

Dimanche 24 mai - 17h30

Dù peut-on découvrir des bords de mer préservés en France ?
Des dunes du Nord aux mangroves
Animé par M.-O. Monchicourt, journaliste.
Avec A. Konitz, commissaire de l'exposition « Littoral : 40 ans de merveilles préservées en France », Conservatoire du littoral, F. Larrey, photographe, Beaard du vivant et T. Méziane, spécialiste des mangroves, Muséum.

Café-restaurant La Baleine — 47 rue Cuvier, Paris 5

POUR LA SCIENCE



MUSÉUM

NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

..... histoire des sciences



Collection Archives, tome 19
70 x 240 mm broché
texte en français
14 p., 165 figures coul.
SBN 978-2-85653-755-8
Prix 42€ TTC (39,81 HT)
Décembre 2014

LA RÉPUBLIQUE NATURALISTE
COLLECTIONS D'HISTOIRE NATURELLE
& RÉVOLUTION FRANÇAISE (1789-1804)
Pierre-Yves Lacour

La République naturaliste examine la rencontre entre un petit objet d'histoire de la culture et des sciences, les collections d'histoire naturelle, et un événement colossal, la Révolution. Les années 1789-1804 sont en effet un moment exceptionnel dans la constitution des collections naturalistes françaises. Récoltés, échangés, achetés ou confisqués dans les cabinets aristocratiques et ecclésiastiques, une multitude de spécimens convergent vers le Muséum d'histoire naturelle, tandis qu'une partie des doubles de ces collections nationales est envoyée en province dans les cabinets des Écoles centrales. Le Muséum apparaît alors comme le centre autour duquel s'organisent le rassemblement, puis la dispersion des spécimens et Paris prétend, pour un temps, incarner la capitale universelle de l'histoire naturelle.

En suivant le parcours de ces objets, le livre analyse aussi ce qui se joue au moment où, dans la capitale comme en province, l'histoire naturelle s'institutionnalise, se professionnalise et se spécialise autour de collections refondées ou entièrement nouvelles. Au sein de ces collections, les relations entre objets scientifiques, artistiques et ethnographiques ne sont jamais exactement les mêmes tout comme les pratiques savantes qui fixent la valeur et l'usage des spécimens. C'est ainsi que dans les relations complexes, et parfois tendues, qui se tissent alors entre le Paris naturaliste, l'Europe savante et la province des professeurs, une hiérarchie des positions intellectuelles et des institutions scientifiques s'élabore progressivement.

Une carte inédite du savoir à l'époque révolutionnaire

ouvrage disponible à la librairie des Publications scientifiques face à la Grande Galerie de l'Évolution

Commandes et renseignements
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications scientifiques
Case postale 41 • 57 rue Cuvier
75 231 Paris cedex 05
Tél. 01 40 79 48 05 • Fax 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr



Fouilles virtuelles au quai Branly

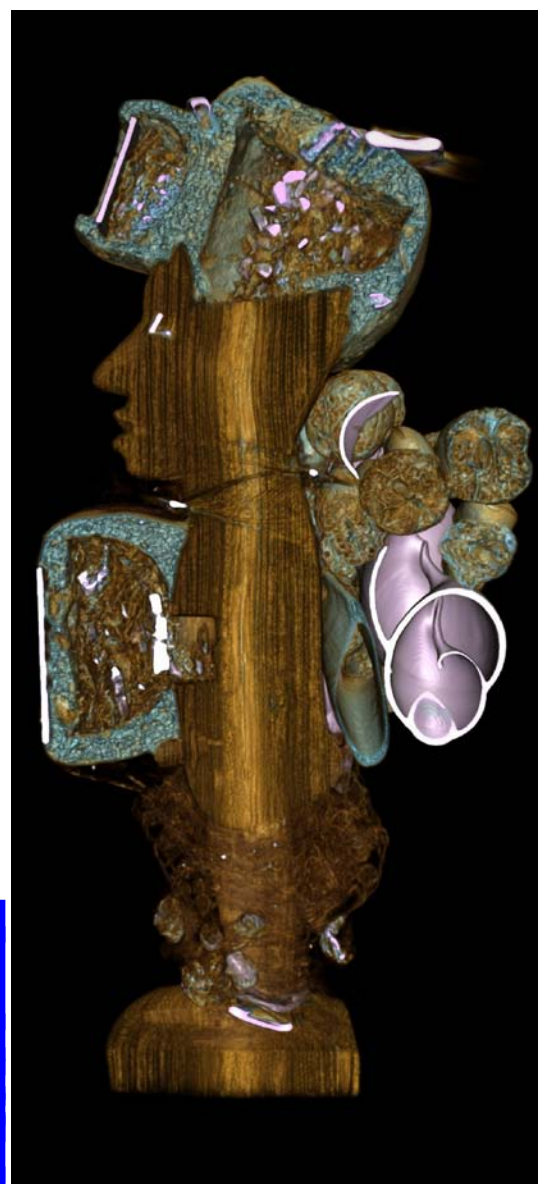
**Entre scanner et imprimante 3D, le musée
du quai Branly, à Paris, présente jusqu'au 17 mai
les « entrailles » secrètes d'une dizaine
de ses chefs-d'œuvre. Du jamais vu**

Écile Lestienne

Examiner les trésors patrimoniaux aux rayons X, l'idée n'est pas nouvelle: dès 1886, un an après la découverte de Wilhelm Röntgen, le musée de Vienne radiographiait le genou d'une momie égyptienne. L'arrivée du scanner dans les années 1970 a certes permis d'affiner les analyses, mais aujourd'hui, les récents développements des technologies d'imagerie sont si spectaculaires et si performants qu'ils révolutionnent le regard des chercheurs sur les objets archéologiques et ethnologiques. Car ces outils numériques, couplés à l'impression 3D, ouvrent des champs d'investigation jusqu'alors inaccessibles en permettant d'effectuer une véritable autopsie virtuelle des œuvres. Et de percer leurs secrets en les manipulant, les démontant, les analysant... sans contact ni intrusion physique. Démonstration en images, tirées de l'exposition *Anatomie des chefs-d'œuvre* proposée par le musée du quai Branly, pionnier dans l'utilisation de ces technologies novatrices.

STRIP-TEASE NUMÉRIQUE

L'aventure a commencé il y a cinq ans, lorsque le musée s'est équipé d'une plateforme de visualisation 3D fondée sur un logiciel développé par Vizua, une start-up qui collabore avec l'École de médecine Paris-Descartes. «Auparavant, analyser une œuvre exigeait de l'immobiliser pendant des semaines», explique Christophe Moulherat, chargé d'analyses des collections et commissaire de l'exposition. «Aujourd'hui, nous sortons une pièce pour la faire scanner dans un hôpital, le soir, après les horaires de consultations. Nous récupérons les données numériques en quelques secondes et nous les transférons sur un ordinateur puissant situé au musée. Le lendemain matin, l'objet a retrouvé sa place dans les collections.» Entre-temps, les chercheurs analysent les images et, en jouant sur les fausses couleurs, observent la différence de densité des matériaux, comme ici où se dévoilent bois, coquillage, textile, verre, céramique... qui composent cette sculpture magique nkisi.





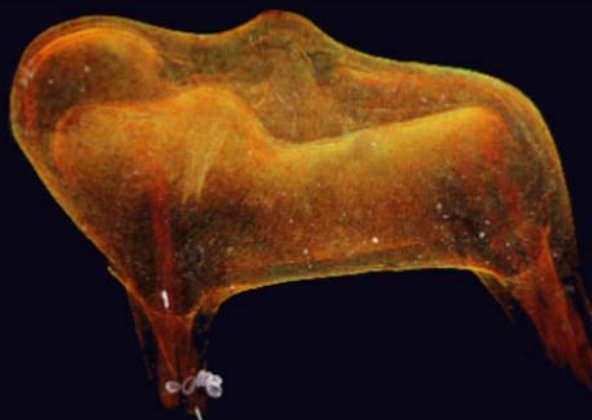
statuette magique nkisi «bumba mazi» (celui qui procure la richesse) originaire de Cabinda (Angola) et datant d'avant 1933. Bois, coton, coquillage, corne, métal, miroir, coquille d'escargot, graines, noix fruits, pigments. 38,2 x 22,2 x 30 cm. 2.569,6

Sous toutes les coutures

Consultables depuis n'importe quel ordinateur connecté à Internet, ces images permettent un véritable travail collaboratif. Conservateur, anthropologue, médecin légiste... se sont ainsi virtuellement penchés sur cet émouvant *fardo*, un paquet funéraire péruvien appartenant à la culture Chanca (1100-1450). À l'intérieur : en position fœtale, la tête en bas, la momie d'un enfant d'environ six ans au crâne étiré vers l'arrière, une déformation traditionnelle due à l'apposition de plaquettes en bois sur le front et les tempes depuis la naissance. Le bassin écrasé n'a pas livré son sexe et aucune lésion traumatique n'a donné l'indice sur les causes de sa mort. Mais l'on aperçoit des épis de maïs, des outils de filage, des graines de coton, des feuilles de coca... disposés de part et d'autre de la momie pour l'accompagner dans son ultime voyage. Et dans chacune de ses mains, un curieux objet composite que les chercheurs n'ont pas encore identifié.



Bois, objet cultuel de la société masculine du Kono (Mali) datant probablement du début du XX^e siècle. 2 x 16 x 52 cm. 9441g





ardo, paquet funéraire péruvien
culture Chancay (1100-1450)
82,5 x 40 x 30,5 cm - 10 500 €



main en bois tenant un objet rituel



SECRETS DE FABRICATION

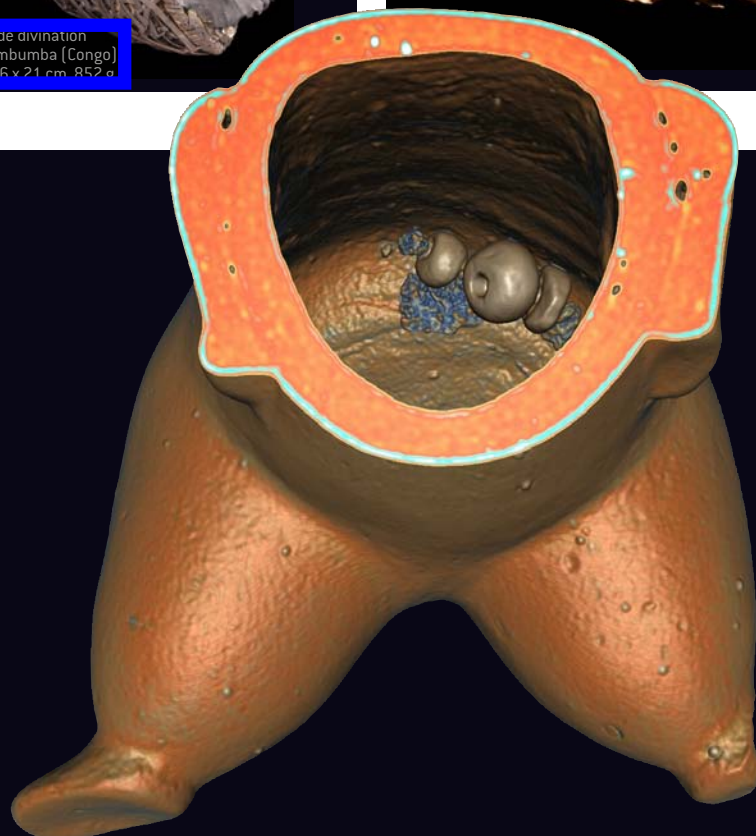
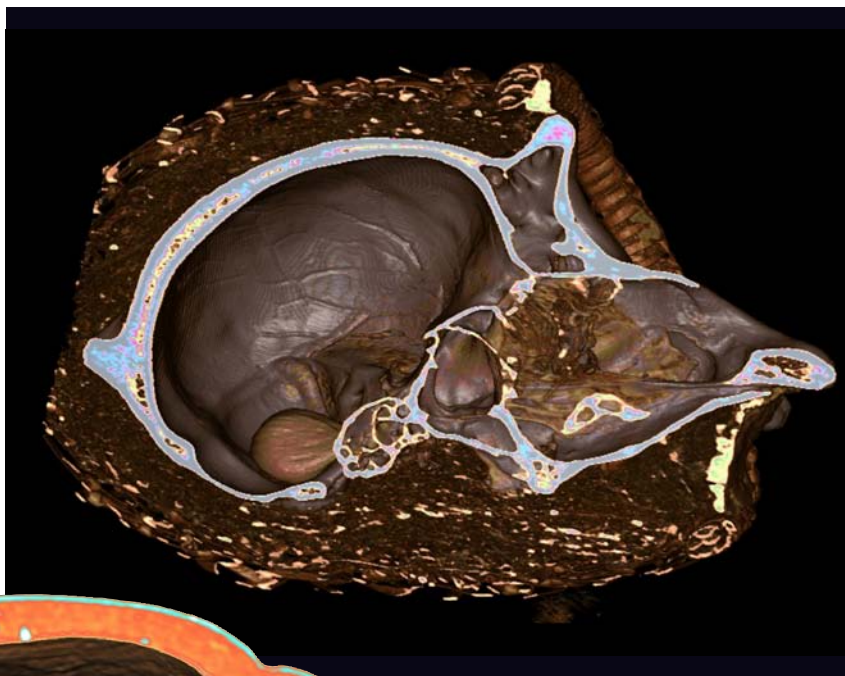
Les Boli sont parmi les objets les plus sacrés des populations bambaras du Mali. Capables de faire pleuvoir, de soigner de multiples maux, de lire l'avenir, d'envoûter un individu ou de le tuer. Fabriqués par les initiés selon un rituel complexe, toujours loin du regard des profanes, ce sont des amalgames de bois, écorces, feuilles, terre, cuir, os, poils, griffes... voire de phalanges et de placenta humain. Pour les activer, il faut les lasser par des paroles, les entretenir par divers saupoudrages et les alimenter par des sacrifices sanglants. D'où la patine croûteuse de cet objet, faite de bouillie de mil, de sang séché, de poudres végétales et de noix de cola mâchées puis crachées lors des prières et sacrifices. Les couches s'accumulent au fil du temps comme on le voit sur l'image du nilieu. L'image de droite révèle la structure en bois (les « pattes » du Boli), avec le tube central horizontal qui permet de « nourrir » l'objet ; et surtout les six petites cornes d'antilope disposées verticalement (dans le cercle), la « charge » magique qui donne vie au Boli et lui confère son *nuama*, sa puissance surnaturelle.

LE FRUIT INATTENDU

Cet objet de divination nkisi-mbumba intriguait beaucoup les conservateurs : quand on le manipulait, on entendait rouler comme une bille à l'intérieur. L'imagerie a révélé qu'il s'agissait d'une sorte de graine de la grosseur d'une figue, enfermée dans un crâne de gorille emelle dont on ne voyait jusqu'alors que la face émergée de la résille végétale. Consulté, un botaniste du Muséum national d'histoire naturelle ne put se prononcer. Jusqu'à ce que la « graine » soit imprimée en 3D : il identifia alors le fruit du palmier à huile, un arbre à haute valeur symbolique, à l'origine du monde vivant, dans l'aire culturelle Kongo.



Objet de divination
nkisi-mbumba (Congo)
10 x 16 x 21 cm, 852 g



LES REVELATIONS DE L'AVATAF

La tête appartient-elle au corps ? se demandaient les conservateurs du musée en regardant la mauvaise restauration sur le cou de cette statuette qu'atémaltèque (800-300 av. J.-C.). En pénétrant au cœur même de la terre cuite, les images numériques ont montré qu'effectivement, la pâte céramique de la tête est bien plus épaisse et d'une autre facture que celle du corps. Ce qui plaide pour une origine distincte des deux éléments. Pour observer de plus près les trois perles de pierre dure apparues à l'intérieur de la sculpture, le musée a réalisé une impression 3D de l'objet... qu'il a coupé en deux ! « On a bien vu alors, commente Christophe Moulherat, que les perles, vraisemblablement du jade, ont été perforées en deux temps, probablement avant l'arrivée des outils en métal. »



Personnage assis,
tréclassique moyen

800 - 300 av. J.-C., terre cuite
rupe - Culture Maus des Hautes

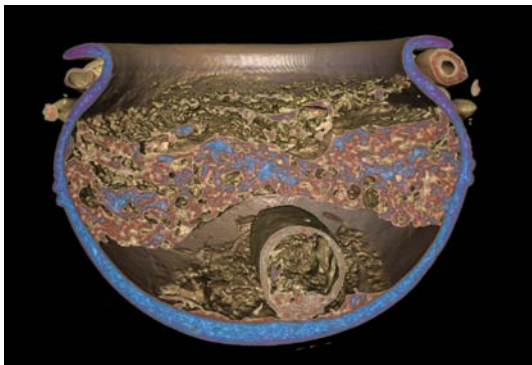
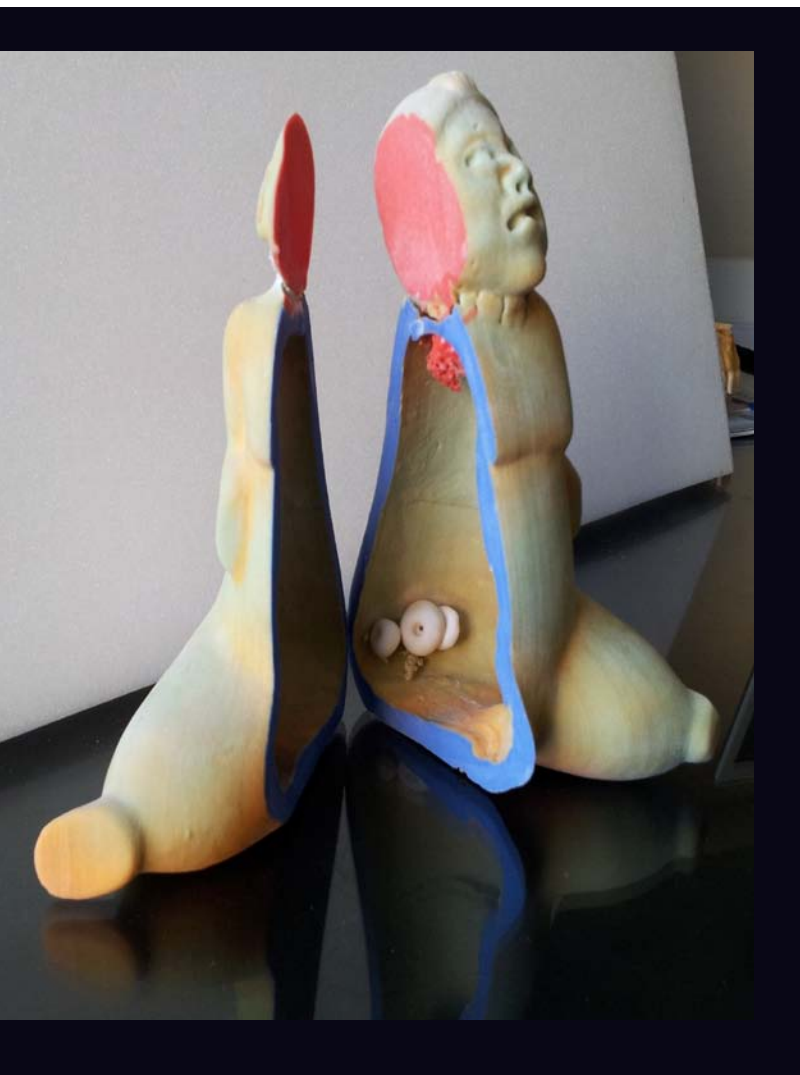
2012-2013, 10 cm, 100 g

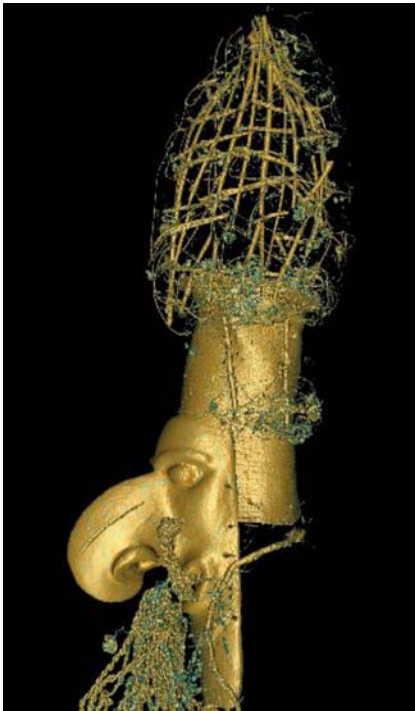
UN OBJET PEUT EN CACHER UN AUTRE

Que cache ce tressage de fibres végétales et la route de terre noirâtre, probablement de la terre des ancêtres récupérée dans un sanctuaire, qui en obstrue l'ouverture ? L'étude de ce récipient magique nkisi a révélé bien des surprises. D'abord, deux rangs de fruits du palmier à huile, arbre sacré le long du fleuve Kongo, posés comme un collier sur le col du vase. Ensuite, un magnifique décor géométrique fait de lignes et de chevrons sur toute la partie supérieure du récipient. Enfin, à l'intérieur, un sachet de tissu rempli de perles en pierre, de griffes et d'os d'animaux qu'il est difficile d'identifier. Des éléments que l'on n'aurait jamais pu observer autrement, sauf en ouvrant l'objet, donc en le détruisant.

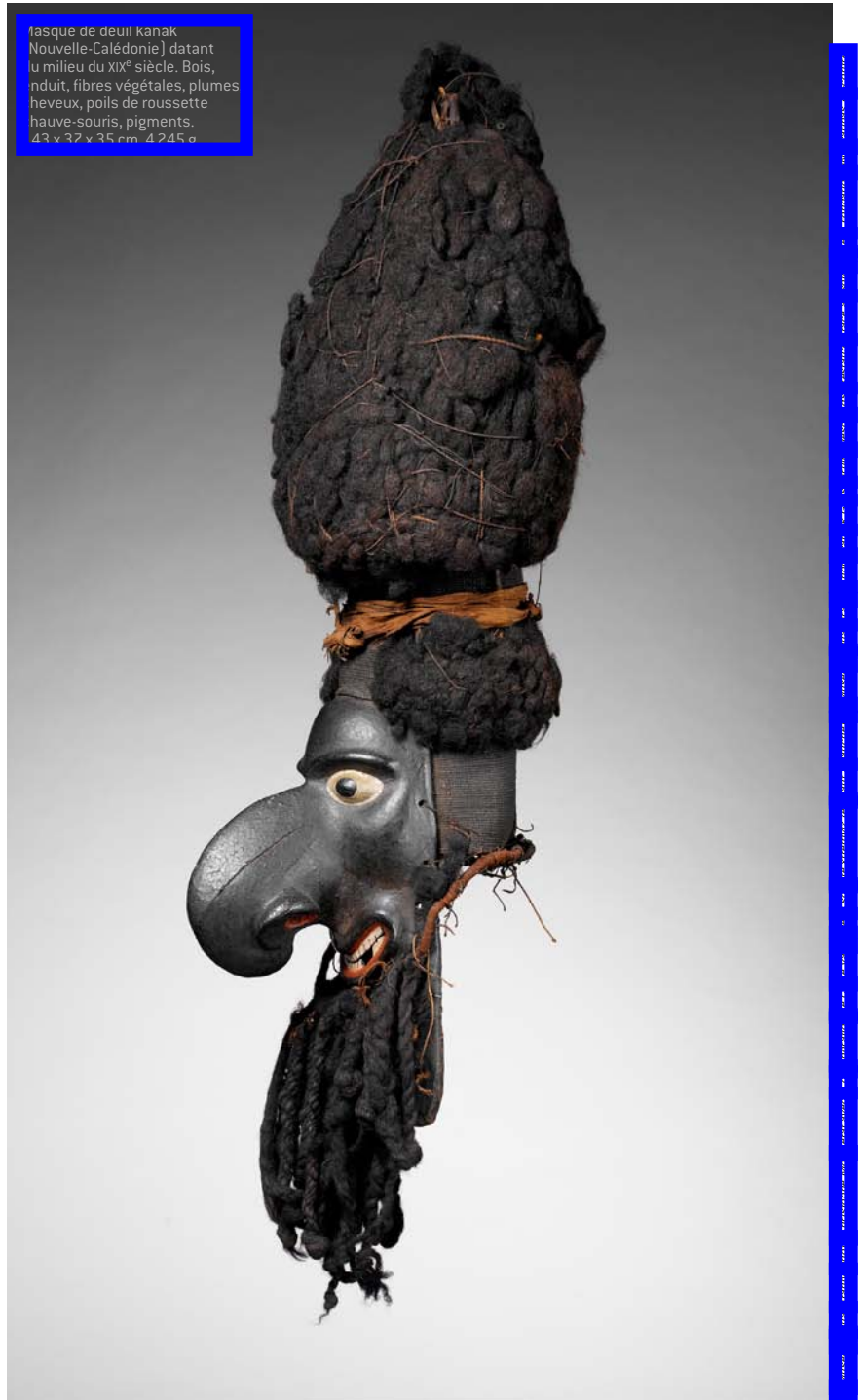


Recipient magique, tétiche de guerre, originaire
de Loango (république du Congo) et datant d'avant 1892
Terre kaolin, fibres végétales. 20,6 x 33 x 34 cm. 41250





Masque de deuil kanak (Nouvelle-Calédonie) datant du milieu du XIX^e siècle. Bois, enduit, fibres végétales, plumes de poule, poils de roussette, plumes de vautour, pigments. 43 x 32 x 35 cm, 4 245 g.



CHEVELURE MAISON

Pour la grande exposition *Kanak, l'Art est une parole* que le musée du quai Branly a organisée en 2013, restaurer les 12 masques kanaks de la collection était impératif : leurs hautes chevelures branlaient dangereusement du chef. Les images prises pour cette campagne ont dévoilé la structure en bois qui sous-tend les cheveux et les poils de l'énorme perruque. « Les personnalités kanakes, venues en observation, ont été très étonnées d'y reconnaître l'architecture de leurs maisons de cérémonie, raconte Olivia Bourrat, co-commissaire de l'exposition. Ils ignoraient qu'un symbole de leur structure sociale se cachait dans ces chevelures. Il faut dire qu'après l'arrivée des premiers missionnaires en Nouvelle-Calédonie au milieu du XIX^e siècle, la production de ces masques de deuil s'est très vite arrêtée et la tradition s'est perdue. » Par ailleurs, ces mêmes images ont permis aux restaurateurs de visualiser tous les points de faiblesse et les brisures, et de les réparer sans démonter l'assemblage. Un vrai travail de microchirurgie.



L'HOMME SANS VISAGE

se protéger, se venger, prédire l'avenir... autant de fonctions pour cet objet magique nkisi kula. Y planter un clou permet de l'activer et on en perçoit plusieurs sur cette image numérisée qui divulgue les dessous de la statuette anthropomorphe, entièrement recouverte de tissu, de coton, de vanneries, le tout soigneusement ficelé par des liens de fibres végétales. L'image révèle également que le personnage au corps sculpté avec soin, mais au visage simplement ébauché, a vu ses pieds et ses mains coupés avant d'être enveloppé. Et elle dévoile, sans ambiguïté, qu'il s'agit d'un homme.



Statuette anthropomorphe originaire de la région du Moyen-Congo. Bois, textile, fibres végétales.
22 x 12,8 x 8,9 cm, 1 342 g



L'Anatomie des chefs d'œuvre

Musée du quai Branly

mar., mer., dim. : 11 h à 19 h
jeu., vend., sam. : 11 h à 21 h
jusqu'au 17 mai 2015

www.quaibranly.fr

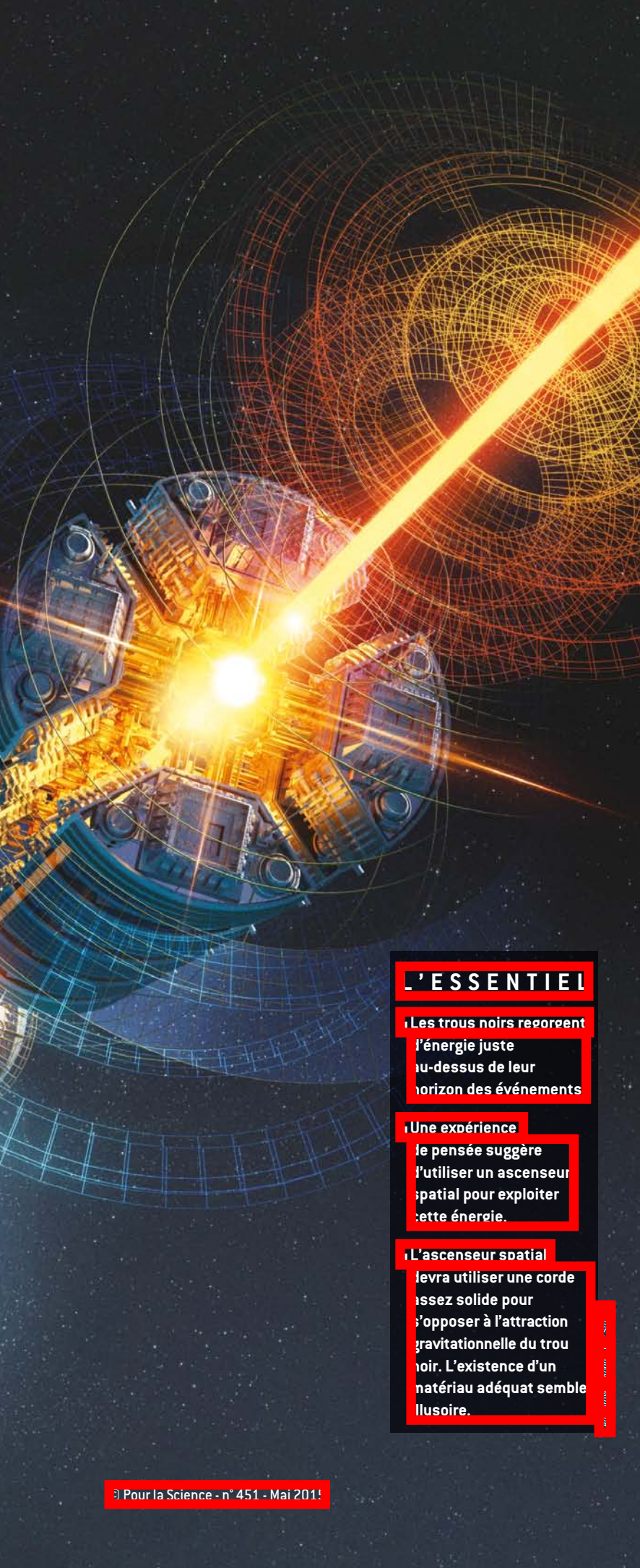
Est-il possible d'exploiter un trou noir ?

L'environnement immédiat d'un trou noir contient une importante quantité d'énergie. Mais pour en extraire, une civilisation future devra construire un ascenseur spatial qui défie les lois de la physique

Adam Brown

■ Imaginons le pire scénario de science-fiction possible. Le Soleil s'est arrêté de briller, le combustible qui alimentait la fusion nucléaire s'étant épuisé. La Terre – si elle survit à la mort de l'étoile – est alors plongée dans un hiver perpétuel. Et s'il en reste encore là, l'homme doit trouver des sources d'énergie ailleurs, dans d'autres étoiles pour commencer. Néanmoins, une fois que toutes les étoiles se seront éteintes, que restera-t-il comme source d'énergie ? Les trous noirs. Mais sera-t-il possible de récupérer cette énergie et de sauver la civilisation ?

Certes, ce scénario est « tiré par les cheveux ». Mais nous pouvons tout de même



L'ESSENTIEL

Les trous noirs renvoient l'énergie juste au-dessus de leur horizon des événements

Une expérience de pensée suggère l'utilisation d'un ascenseur spatial pour exploiter cette énergie.

L'ascenseur spatial devra utiliser une corde assez solide pour s'opposer à l'attraction gravitationnelle du trou noir. L'existence d'un matériau adéquat semble illusoire.

nous demander s'il est possible d'exploiter l'énergie d'un trou noir. Ces questions sont un bon prétexte pour se pencher sur la physique d'un trou noir, en particulier celle de son horizon des événements, et d'étudier la possibilité de construire une structure gigantesque et popularisée par la science-fiction : l'ascenseur spatial.

Une frontière sans retour possible... ou presque

À première vue, extraire de l'énergie (ou quoi que ce soit) d'un trou noir semble impossible. En effet, on définit l'horizon des événements d'un trou noir comme la frontière qui délimite la région sphérique où le champ gravitationnel du trou noir devient si intense que tout ce qui y pénètre ne peut plus s'en échapper : ni les météorites, ni les fusées, ni même la lumière (voir la figure a, page 56). Tout ce qui s'aventure à l'intérieur de cette sphère est voué à disparaître. De la même façon, une bombe larguée sur le trou noir, loin de le détruire, ne servirait qu'à le faire grossir d'une quantité égale à la masse de la bombe.

C'est en tout cas ce que l'on pensait. Mais dans un article publié en 1974, Stephen Hawking montrait que nous nous trompions. En développant des idées de Jacob Bekenstein, maintenant à l'Université hébraïque de Jérusalem, Stephen Hawking expliquait que les trous noirs laissent fuir de petites quantités de rayonnement. Vous mourrez quand même si vous tombez dedans, mais, bien que vous ne puissiez jamais refaire surface en tant que personne, votre énergie finira par ressortir. Et c'est une bonne nouvelle pour ceux qui voudraient exploiter les trous noirs : de l'énergie s'en échappe.

La raison pour laquelle cette énergie s'échappe est liée aux lois de la mécanique quantique. Un des phénomènes caractéristiques de la physique quantique est qu'elle permet aux particules de passer par effet tunnel à travers des obstacles qui, classiquement, devraient être infranchissables. N'essayez pas de le faire chez vous : si vous vous jetez sur un mur, vous avez peu de chances de réapparaître intact.

LES ASCENSEURS SPATIAUX transporteront peut-être un jour des objets de la Terre vers l'espace. Un tel dispositif permettrait-il d'extraire de l'énergie d'un trou noir ?

de l'autre côté... En revanche, les particules microscopiques ont une probabilité infime, mais non nulle, d'y parvenir. Par exemple, sans cet effet tunnel quantique, la radioactivité alpha ne serait pas possible : une particule alpha (un noyau d'hélium) ne pourrait pas s'échapper d'un noyau d'uranium radioactif.

Le « rayonnement de Hawking » fuit hors du trou noir grâce à l'effet tunnel. Les particules échappent au champ gravitationnel intense de l'horizon non pas grâce à une vitesse élevée, mais en se frayant un chemin par effet tunnel. La particule prisonnière dans le trou noir peut passer de l'autre côté de l'horizon et prendre le large.

Le rayonnement est très faible : un trou noir de la masse du Soleil luit si faiblement que sa température n'est que de 60 nanokelvins. Jusque dans les années 1980, nous ne savions même pas comment obtenir quelque chose d'aussi froid en laboratoire. La température de ce trou noir est même plus faible que celle associée au rayonnement du fond diffus cosmologique, émis dans l'Univers alors âgé de 380 000 ans, et qui est aujourd'hui de 2,7 kelvins environ.

Ainsi, aucune observation astrophysique n'a permis de mettre en évidence le rayonnement de Hawking émis par un trou noir, mais c'est une conséquence mathématique tellement convaincante de l'application de la mécanique quantique à l'espace-temps courbe que personne n'ose en douter.

Puisque les trous noirs libèrent de l'énergie, nous pouvons espérer la récupérer et l'exploiter. Mais le diable est dans les détails. Nous allons voir que quelle que soit la manière dont nous essayons d'extraire cette énergie, nous rencontrons des difficultés.

Une approche simple consisterait à simplement attendre. Le trou noir devrait finalement s'évaporer, émettant son énergie, photon après photon, dans l'Univers. Alors qu'il rayonne, le trou noir perd en masse, jusqu'à finalement disparaître. En ce sens, un trou noir est comparable à une tasse de café dont on ne peut pas toucher la surface, sous peine de démembrement gravitationnel. Il reste un moyen de consommer le café cataclysmique : attendre qu'il s'évapore et inhaler ses vapeurs.

Mais il y a un hic. S'il est simple d'attendre, cette méthode n'est pas très efficace. Pour s'évaporer totalement, un trou noir de la masse solaire mettrait 10^{57} fois l'âge actuel de l'Univers, une durée prodigieusement longue. En général, la durée de vie d'un trou noir est proportionnelle à sa masse au cube. Pas de quoi motiver nos descendants.

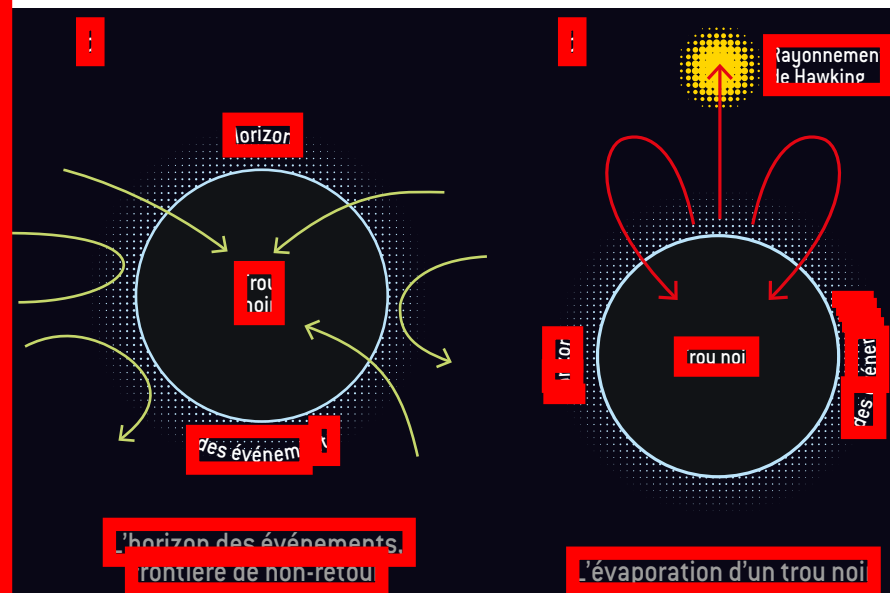
In réservoir de particules à exploiter

Cependant, il y a une raison d'être optimiste : toutes les particules de Hawking qui sortent de l'horizon des événements ne s'échappent pas à l'infini. En fait, très peu y parviennent, ce qui explique pourquoi le rayonnement est si faible (voir la figure ci-dessous). Presque toutes les particules qui sortent par effet tunnel de l'horizon

passent juste à l'extérieur de l'horizon. Pour que la lumière s'échappe, il faut que vous soyez bien vertical ; et plus vous êtes proches de l'horizon, plus il vous faudra viser avec précision la verticale. Le champ gravitationnel y est si intense que si vous déviez un peu de cette direction, le trajet de la lumière se courbera et retombera dans le trou noir.

Arrêtons-nous sur ce point. Pourquoi la direction non verticale précipite-t-elle le destin de la particule ? Si la trajectoire n'est pas exactement verticale, une partie du mouvement peut être considérée comme un mouvement de rotation autour du trou noir. Et c'est la vitesse de rotation qui nuit aux chances d'évasion de la particule.

Cela semble étrange. Après tout, c'est précisément la vitesse en orbite qui assure à la Station spatiale internationale de rester



les événements sont recapturées par le champ gravitationnel et récupérées par le trou noir. Si nous trouvons un moyen d'arracher ces photons à l'emprise du trou noir, à les secourir après leur évasion et avant leur recapture, alors nous pourrions recueillir plus rapidement l'énergie.

Afin de comprendre comment sauver ces photons, nous devons commencer par étudier les forces extrêmes à l'œuvre près d'un trou noir. La raison pour laquelle la plupart des particules sont recapturées est qu'elles ne sont pas émises exactement à la verticale. Imaginez que vous teniez un

en l'air : le mouvement de rotation crée une force centrifuge – similaire à ce qu'on ressent dans une voiture prenant un virage – qui contre l'attraction de la Terre et maintient la station à une altitude constante (voir la figure ci-dessus). Mais si vous vous approchez trop près d'un trou noir, la situation s'inverse : la vitesse rotationnelle empêche la libération. Cet effet résulte de la théorie de la relativité générale, selon laquelle toute la masse et l'énergie sont soumises à la gravité – pas seulement la masse au repos d'un objet, mais aussi son énergie cinétique orbitale. La force centrifuge est

toujours présente, mais, à proximité d'un trou noir (plus précisément, à moins d'une fois et demie le rayon de l'horizon des événements), l'attraction gravitationnelle liée à l'énergie cinétique orbitale est plus forte que la répulsion centrifuge (voir la figure d ci-dessous). En deçà de ce rayon, une vitesse angulaire plus élevée fait tomber les particules plus vite dans le trou noir.

La conséquence qui nous intéresse ici est que juste au-dessus de l'horizon du trou noir beaucoup plus de particules sont présentes que ne le laisse penser le rayonnement de Hawking qui s'échappe vraiment de l'astre. Cette prolifération de particules énergétiques conduit à définir l'« atmosphère thermique » du trou noir : plus vous vous rapprochez de l'horizon des événements, plus il fait chaud. Cette chaleur est porteuse d'énergie.

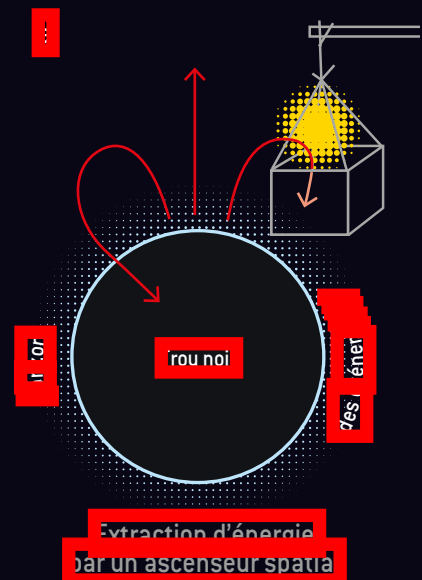
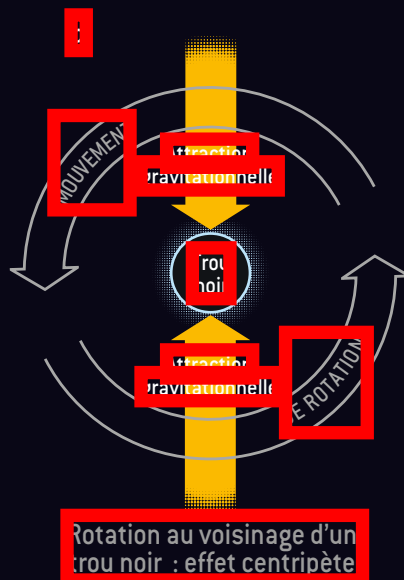
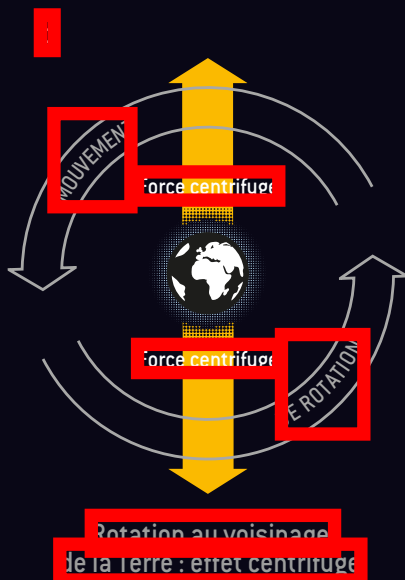
L'AUTEUR



Adam BROWN est physicien théoricien à l'Université Stanford, aux États-Unis.

Cette stratégie revient à souffler sur votre café. Sans cette action, la majeure partie de la vapeur d'eau émise retombe dans la tasse, mais en soufflant à la surface, on éloigne la vapeur fraîchement échappée avant qu'elle n'ait été recapturée. L'idée est donc la suivante : en dépouillant un trou noir de son atmosphère thermique, on accélère son évaporation. Sa durée de vie ne sera plus proportionnelle à la masse au cube, mais simplement proportionnelle à la masse, ce qui est considérablement plus court.

Cependant, j'ai montré que cette idée est impossible à mettre en pratique. L'obstacle ne vient pas de hautes considérations sur la mécanique quantique ou la gravitation quantique. Il découle d'une considération des plus triviales : il n'existe pas de corde assez solide pour retenir la boîte et l'empêcher de tomber dans le trou noir. Afin

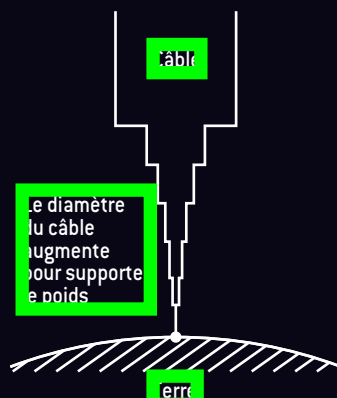
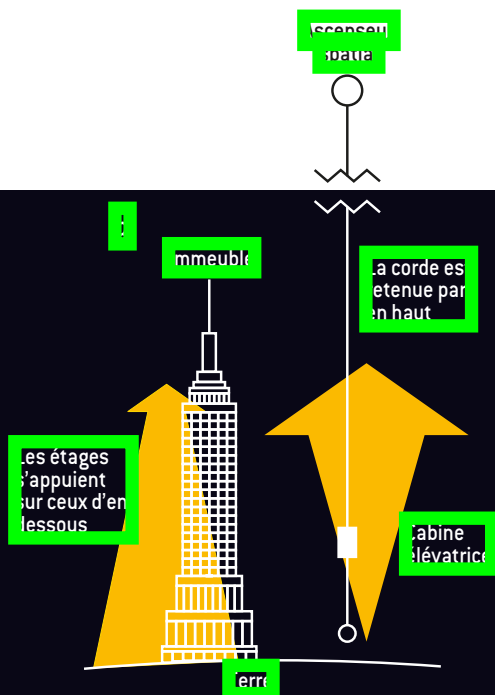


Le fait que de l'énergie soit stockée à l'extérieur de l'horizon des événements laisse espérer une possibilité de la récupérer. Reste à voir comment, concrètement, extraire cette énergie. L'idée consisterait à approcher une boîte près de l'horizon du trou noir, à la remplir de gaz chaud – les particules de Hawking – et à la ramener loin du trou noir (voir la figure ci-dessus). Sans aide, une partie du contenu aurait pu réussir à s'échapper, formant le rayonnement de Hawking classique, mais la majeure partie du gaz, si nous n'étions pas intervenus, était destinée à retomber dedans.

l'exploiter l'atmosphère thermique, vous devez parvenir à faire pendre une corde près d'un trou noir, autrement dit, vous devez créer un ascenseur spatial. Mais, comme je l'ai démontré, construire un ascenseur spatial efficace près d'un trou noir est impossible. Pourquoi ?

L'ascenseur spatial est une structure futuriste, rendue célèbre grâce à l'auteur de science-fiction Arthur Clarke dans son roman de 1979, *Les Fontaines du paradis*. Il imaginait une corde qui pend depuis l'espace jusqu'à la surface de la Terre. Cette corde est tenue non pas par la réaction du

sol (comme dans un gratte-ciel, où chaque étage tient ceux du dessus), mais par une traction du haut (chaque segment de corde tient celui du dessous) (voir la figure a ci-dessous). L'extrémité de la corde est amarrée à une énorme masse en orbite lente très au-delà de l'orbite géostationnaire, qui tire la corde vers l'extérieur, maintenant l'ensemble en l'air. L'extrémité basse de la corde pend juste au-dessus de la surface



ne pas s'étirer ou casser sous la tension, et léger pour ne pas inutilement charger la corde au-dessus.

L'acier n'est pas assez résistant, loin de là. Pour compenser ce défaut et pour faire supporter le poids du câble à l'acier, une solution serait d'augmenter sa section à mesure que l'altitude augmente. Mais, au voisinage de la Terre, le câble devrait doubler son diamètre tous les quelques kilomètres (voir la figure b, ci-contre). Longtemps avant d'atteindre le point géostationnaire, il aurait atteint une épaisseur irréaliste.

Construire un ascenseur spatial pour la Terre avec des matériaux du XIX^e siècle est tout simplement impossible. Mais des matériaux du XXI^e siècle sont prometteurs. Les nanotubes de carbone, de longs rubans de carbone ayant une structure en nid-d'abeilles, sont 1 000 fois plus résistants que l'acier. Ils font d'excellents candidats pour la construction d'un ascenseur spatial.

Un tel projet coûterait des milliards de dollars et serait de loin le plus grand chantier jamais entrepris. En outre, cela nécessiterait de trouver comment

de la Terre, l'équilibre des forces en jeu étant tel qu'elle flotte là comme par magie. La magie, faisait remarquer Clarke, est impossible à distinguer de technologies suffisamment avancées).

L'idée de cette technologie avancée est qu'une fois la corde en place, il devient beaucoup plus facile de monter des charges en orbite. Fini le danger, l'inefficacité ou les gaspillages d'une fusée qui, durant la première partie de son voyage, soulève essentiellement du carburant. Au lieu de cela, nous attacherions à la corde un ascenseur électrique. Le coût de déplacement d'une cargaison jusqu'en orbite terrestre basse ne sera plus que celui de l'électricité, et monter un kilogramme dans l'espace ne coûtera plus les dizaines de milliers de dollars facturés par la navette spatiale, mais reviendra à quelques dollars: un voyage dans l'espace pour le prix d'un ticket de métro.

Les obstacles technologiques à la construction d'un ascenseur spatial sont nombreux, et le plus important est de trouver un matériau adéquat pour la corde. Il doit être à la fois solide et léger: solide pour

porter des nanotubes de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres de long, et il y aurait évidemment de nombreux autres obstacles à surmonter. Mais pour un physicien théoricien comme moi, une fois établi le fait qu'une structure proposée ne viole pas les lois connues de la physique, tout le reste n'est qu'ingénierie.

Ascenseur pour trou noir

Autour d'un trou noir, bien sûr, le problème est beaucoup plus compliqué. Le champ gravitationnel est plus intense, et ce qui fonctionne autour de la Terre est insuffisant pour le cas qui nous intéresse.

Même en utilisant les nanotubes de carbone dont on vante tant la résistance, un hypothétique ascenseur spatial qui descendrait tout près de l'horizon d'un trou noir serait soit tellement fin à proximité du trou noir qu'un seul photon suffirait pour le casser, soit tellement épais à distance du trou noir que la corde s'effondrerait sous sa propre gravité et deviendrait elle-même un trou noir.

BIBLIOGRAPHIE

A. Riazuelo, À l'horizon des trous noirs, *Dossier Pour la Science*, n° 83, avril-juin 2014.

A. Brown, Tensile strength and the mining of black holes, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 111, 211301, 2013.

A. Zakri et al., Les nanotubes: les fibres d'avenir!, *Dossier Pour la Science*, n° 79, avril-juin 2013.

A. Parentani, Les prédictions de Stephen Hawking, *Dossier Pour la Science*, n° 75, avril-juin 2012.

V. G. Unruh et R. M. Wald, Acceleration radiation and the generalized second law of thermodynamics, *Phys. Rev. D*, vol. 25(4), pp. 942-958, 1982.

Arthur C. Clarke, Les Fontaines du paradis, *Folio SF*, 2005.

Cela élimine les nanotubes de carbone. Mais de la même manière que l'âge de Fer a suivi l'âge de Bronze, et que les nanotubes de carbone succéderont un jour à l'acier, nous pouvons espérer découvrir des matériaux encore plus résistants et plus légers. Mais les améliorations ne peuvent pas se poursuivre indéfiniment. Il y a une limite au progrès de l'ingénierie, imposée par les lois de la nature. En ce qui concerne l'ascenseur spatial près d'un trou noir, c'est la limite du rapport résistance à la traction/poids du matériau qui est le facteur déterminant. Ce rapport est insuffisant pour l'acier et les nanotubes, mais existe-t-il un matériau assez résistant ? La résistance maximale théorique, indépendamment du matériau, est calculable, et est une étonnante conséquence de la relation $E=mc^2$ d'Albert Einstein.

Comment évaluer la résistance à la traction d'une corde pour éviter qu'elle ne casse ? La tension d'une corde indique combien d'énergie vous devez dépenser pour l'allonger : plus la corde est tendue, plus cela coûte en énergie pour l'allonger. Un élastique a une certaine tension parce que vous dépensez de l'énergie à réarranger ses molécules pour l'étirer : quand les molécules sont faciles à réarranger, la tension est faible ; quand il faut beaucoup d'énergie pour réarranger les molécules, la tension est élevée.

Réarranger les molécules n'est pas la seule façon d'allonger la corde. Il est aussi possible d'ajouter des molécules, une à une, à une extrémité (ce qui revient à coller un bout de corde à la précédente). L'énergie fournie pour créer les molécules que l'on colle est donnée par la relation d'Einstein, $E=mc^2$: l'énergie est égale au produit de la masse (m) du nouveau segment de corde par le carré de la vitesse de la lumière (c^2).

C'est une façon très coûteuse de rallonger une corde. On peut montrer que ce raisonnement fournit une limite supérieure au coût en énergie pour allonger une corde, et donc une limite théorique à la tension de la corde indépendamment de sa composition. Aucune corde ne pourra résister à une tension supérieure à la masse par unité de longueur multipliée par c^2 .

Cette limite fondamentale de la résistance des matériaux laisse une grande marge

de progrès. La résistance de l'acier est des centaines de milliards de fois inférieure à cette limite théorique et, à masse égale, la résistance des nanotubes de carbone reste encore des centaines de millions de fois plus faible. Cette limite théorique signifie aussi que nous ne pouvons pas améliorer indéfiniment nos matériaux, tout comme nos efforts pour nous propulser plus rapidement sont limités par la vitesse de la lumière.

Il existe un matériau hypothétique qui atteint précisément la limite. Ce matériau n'a jamais été observé dans un laboratoire, et certains physiciens doutent même de son existence, mais il a déjà un nom : la corde

réaliser cet exploit, ce sont bien les cordes quantiques ; réciproquement, si les cordes quantiques n'y parviennent pas, les trous noirs n'ont rien à craindre.

À nouveau, nous rencontrons un obstacle : les cordes quantiques ne sont pas tout à fait assez solides pour l'usage que nous voulons en faire. Un rien plus solides et il serait « facile » de construire un ascenseur spatial, même autour d'un trou noir ; un peu plus fragiles, et le projet serait désespéré : la corde casserait sous son propre poids. Les cordes quantiques sont exactement à la limite : un câble constitué de cordes quantiques et qui pend vers la surface d'un trou noir a juste assez de résistance pour supporter son propre poids, mais il ne peut pas supporter la charge de l'ascenseur. La

charge est de trop

Le câble peut donc atteindre l'atmosphère dense du trou noir, mais il ne suffit pas pour l'exploiter. Une solution serait de descendre le câble seulement dans la haute atmosphère : la quantité d'énergie y est limitée, mais exploitable.

Cependant, ce régime maigre ne vaut pas beaucoup mieux que de simplement attendre que le trou noir s'évapore, le rendement étant quasiment le même. En braconnant quelques photons ici ou là, nous pourrions éventuellement raccourcir un peu la durée de vie d'un trou noir, mais nous ne parviendrions pas à mettre en place le type d'extraction industrielle qui serait nécessaire pour alimenter une civilisation affamée.

Le problème posé au départ est encore une fois « tiré par les cheveux », mais il nous a permis de nous aventurer aux limites de la physique, là où la vitesse finie de la lumière est un obstacle. Celle-ci nous empêche d'échapper à l'horizon d'un trou noir ou de construire un ascenseur cosmique, puisqu'une corde ne peut jamais être plus solide que le carré de la vitesse de la lumière multiplié par sa masse par unité de longueur.

Les trous noirs peuvent être tranquilles : on ne pourra pas leur soutirer de l'énergie plus vite qu'ils ne s'évaporent. Heureusement, l'humanité a encore de beaux jours devant elle pour profiter de la chaleur du Soleil.

Les particules qui foisonnent à l'horizon d'un trou noir constituent un réservoir d'énergie. Les récupérer est-il une utopie ?

quantique. Issue de la « théorie des cordes », les chercheurs l'étudient principalement car elle pourrait être le constituant fondamental de la matière. Pour nos besoins, ce n'est pas son caractère fondamental qui compte, mais sa résistance.

Les cordes quantiques sont solides. Il serait possible de suspendre l'Everest à un câble constitué de cordes quantiques de même taille et de même poids qu'un acet. Les défis d'ingénierie les plus redoutables exigent les matériaux les plus performants. Si nous voulons construire un ascenseur spatial autour d'un trou noir, notre meilleur espoir est d'utiliser des cordes quantiques ; là où les nanotubes ont échoué, les cordes fondamentales réussissent peut-être. Si un matériau peut

Intelligence

Les babouins passent le test

Joël Fagot et Anaïs Maugarc

Experts en analogies, capables de reconnaître leur ignorance, moins aptes à réfléchir quand ils sont stressés... Tel est le portrait des babouins que dressent des études d'un genre nouveau, où des tests cognitifs en libre accès sont mis à disposition des singes.





Les écrans tactiles arrivent chez les singes ! En libre accès dans l'enclos des babouins, à la station de primatologie de Rousset, près d'Aix en Provence, ils permettent de proposer aux animaux toute une série de tests cognitifs. Et d'apporter de nouvelles preuves expérimentales de la continuité entre les facultés mentales de l'homme et celles des primates non humains, que Charles Darwin évoquait déjà en 1871 dans son ouvrage *La descendance de l'homme et la sélection sexuelle*.

Si les premiers contacts européens avec des singes remontent aux expéditions carthaginoises du V^e siècle avant notre ère, leur étude scientifique ne commence qu'au XVIII^e siècle. Les naturalistes, tel Georges-Louis Leclerc de Buffon, en donnent alors une description anatomique précise. Dans les années 1920, les éthologues organisent des expéditions en Afrique et en Asie afin de comprendre leur comportement et leur mode de vie. Ils ramènent quelques spécimens dans des zoos ou des collectionneurs privés.

Depuis cette période, les travaux sur les facultés cognitives des primates ont suivi deux voies. La première consiste à observer le comportement des animaux dans leur milieu naturel, la seconde à les étudier en captivité, dans des environnements contrôlés. Chaque approche a apporté son lot de découvertes. Les recherches de terrain ont par exemple révélé l'extraordinaire complexité de l'organisation sociale des singes : la primatologue britannique Jane Goodall a ainsi observé que les chimpanzés de Tanzanie vivent en petits groupes dirigés par un mâle dominant et se coordonnent pour chasser de petits gibiers. En proposant aux singes de résoudre des tâches précises

L'ESSENTIEL

À la station de primatologie de Rousset, les babouins ont un accès libre à des tests cognitifs depuis leur enclos.

Chaque singe y fait environ un millier de tests par jour.

En augmentant peu à peu la difficulté des tâches, on découvre que les babouins sont capables de mettre en œuvre des capacités cognitives élaborées, auparavant considérées comme l'apanage de l'homme.

On s'aperçoit aussi que le contexte social influence les performances.

et en récompensant les succès par de la nourriture, les recherches de laboratoire ont quant à elles révélé des capacités cognitives insoupçonnées chez ces animaux. En 1972, le chercheur américain David Premack a notamment appris à une femelle chimpanzé l'utilisation d'un langage simple en combinant des symboles en plastique.

Un laboratoire où les singes vivent en groupe

Cependant, les animaux captifs ne déploient sans doute pas toutes les ressources cognitives qu'ils mobilisent dans leur milieu naturel. Dans notre équipe, nous avons élaboré une nouvelle stratégie, à mi-chemin entre les études de laboratoire et celles de terrain. Nous avons installé des dispositifs de tests en libre accès dans des compartiments accessibles depuis un enclos de babouins (voir la figure ci-dessous). Chaque singe peut choisir de quitter momentanément son groupe social pour entrer dans un compartiment. Il y trouve un écran tactile dispensant des tests informatisés et un distributeur de récompenses, qui délivre des grains de blé. Chaque babouin porte une puce électronique, grâce à laquelle nous déterminons son identité.

Cette méthode est inspirée du concept de conditionnement opérant, proposé par les psychologues américains Edward Thorndike, au XIX^e siècle, et Burrhus Skinner, au milieu du XX^e siècle : un animal (ou un homme) apprend à reproduire les comportements qui ont une conséquence positive pour lui. Ainsi, quand on récompense les bonnes réponses, l'animal se prête volontairement aux tests. Comme nous avons placé le dispositif au sein de son milieu de vie, il l'utilise tout



Le babouin sait qu'il sait... ou qu'il ne sait pas

Smaragdin. Connaissez-vous le sens de ce mot ? Non ? Vous avez alors réalisé votre ignorance et, sans doute, saisi un dictionnaire pour la combler. Autrement dit,

vous connaissez ou non la réponse et quelles informations vous manquent. Eh bien, les babouins aussi !

Pour le montrer, nous leur avons proposé un apprentissage qui leur a pris plusieurs semaines et des dizaines de milliers d'essais, lors d'une expérience réalisée avec Raphaëlle Malassis, de notre laboratoire, et Gilles Gheusi de

l'Institut Pasteur. Nous avons présenté aux singes une grille de 12 carrés sur un écran d'ordinateur. Au cours du premier affichage, qui ne durait que quelques millisecondes, deux carrés étaient verts et les autres blancs (a). Dans le

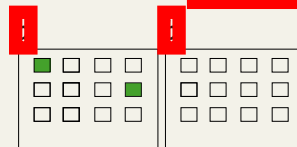
second affichage, tous les carrés de la matrice devenaient blancs (b). Pour obtenir une récompense, les babouins devaient toucher les deux carrés qui étaient en vert dans le premier affichage.

Certains fois, ils avaient la possibilité de ne pas répondre directement et de revoir la partie gauche ou droite du premier affichage, en touchant respectivement la lettre L (pour Left) ou R (pour Right) située en bas de l'écran. C'est ce qu'ils se sont mis à faire après la phase d'apprentissage, lorsqu'ils

avaient mal vu l'une ou l'autre partie du premier écran. Ainsi, ils avaient non seulement quand ils ignoraient la réponse, mais aussi quelles informations leur manquaient et comment les trouver.

Au fait, smaragdin est un adjectif qui signifie « d'un vert émeraude »...

J.F. et A.M.



en restant dans son groupe social – ce qui permet notamment d'étudier l'influence du groupe sur sa cognition.

À l'inverse, dans la plupart des laboratoires, les lieux d'élevage sont séparés du lieu d'expérimentation et les singes sont déplacés pour les tests. Le chercheur choisit l'individu avec lequel il veut travailler et qui impose son rythme. Ici, la démarche est tout autre. Lorsque nous débutons une expérience, les tests sont proposés à l'ensemble des 24 animaux du groupe. Certains babouins apprennent la tâche et d'autres non, car ils n'ont pas tous la même capacité à comprendre les problèmes posés.

À l'ouverture du laboratoire, les singes ont vite découvert qu'ils pouvaient obtenir les récompenses en touchant les écrans

tactiles. Ils ont commencé à effectuer de nombreux passages quotidiens dans les compartiments expérimentaux et nous avons peu à peu augmenté la complexité des problèmes posés. Nous collectons quelque 25 000 essais par jour, ce qui correspond à une moyenne d'environ 1 000 participations quotidiennes par animal. De toute évidence, les singes aiment participer à nos expériences. Ils travaillent par séances de quelques minutes et les ordinateurs ne bouleversent pas leurs comportements spontanés ni leurs relations sociales.

En conséquence, nous avons pu proposer aux singes des apprentissages particulièrement complexes, nécessitant parfois plusieurs dizaines de milliers d'essais. Nous avons ainsi révélé des facultés cognitives insoupçonnées. Le babouin est par exemple capable de métacognition (voir l'encadré ci-dessus) : il sait qu'il sait – ou qu'il ne sait pas !

Ses capacités de raisonnement analogique (sa faculté à trouver le bon choix par analogie avec un modèle) se sont aussi révélées très élaborées. On sait depuis plus de 30 ans que les singes sont capables de distinguer des relations entre objets. En 1984, Anthony Wright, de l'Université du Texas, a par exemple appris à des singes macaques à appuyer sur un levier si on leur montre deux objets différents, et à ne pas appuyer si les objets sont identiques. Les animaux ont donc développé les concepts d'identité et de différence entre objets.

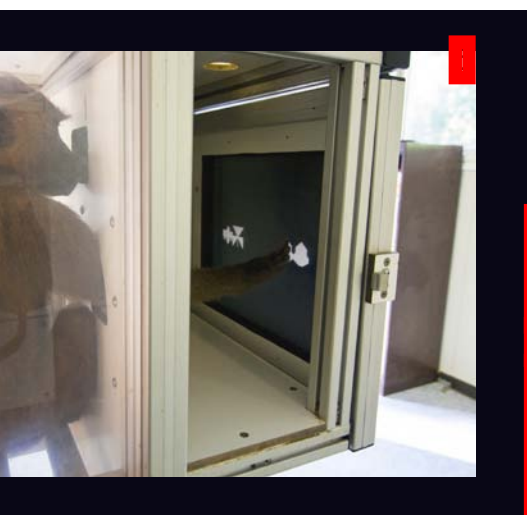
En utilisant le protocole de test en libre accès, nous avons montré que le babouin est

LES AUTEURS



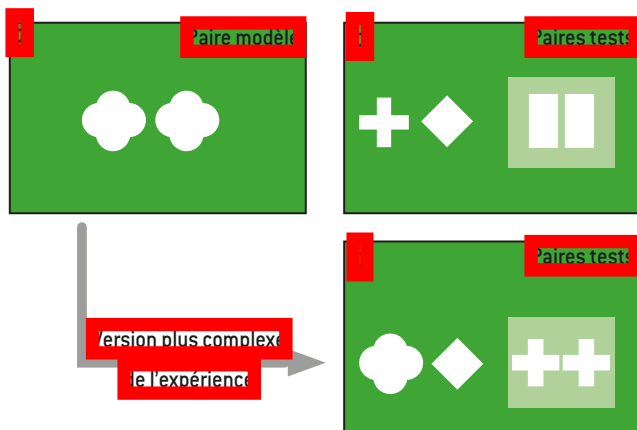
JOËL FAGON est directeur de recherche au CNRS. Il dirige la plateforme Cognition et comportement du primate, à la station de primatologie de Rousset, et l'équipe Cognition comparée, de l'Université d'Aix-Marseille.

ANAIÏS MAUGARD est chercheuse à l'Université d'Aix-Marseille.



DES TESTS EN LIBRE-SERVICE

Les singes sont mis à disposition des singes, qui vivent dans un enclos de 750 mètres carrés et peuvent entrer quand ils le souhaitent dans les bungalows adjacents (a). Chacun de ces derniers comporte cinq postes expérimentaux, équipés d'un écran tactile et d'un distributeur de récompenses (b). Une puce électronique permet d'identifier le singe qui se positionne devant l'écran. Le babouin interagit alors avec l'ordinateur (c) et reçoit une récompense alimentaire lorsqu'il donne la bonne réponse au test.



LE RAISONNEMENT ANALOGIQUE, autrement dit la faculté de trouver le bon choix par analogie avec un modèle, n'a pas de secret pour les babouins. Ils savent notamment reconnaître quand deux éléments ont la même relation au sein d'une paire « modèle » et au sein d'une paire « test ». Ici, les deux éléments de la paire modèle sont identiques (a) et les babouins doivent donc choisir la paire de droite sur l'écran de test (b, en surbrillance). Dans une version plus complexe de cette expérience, la « mauvaise paire » reprend l'un des deux éléments de la paire modèle et a donc un aspect visuel plus proche (c). Dans ce cas, le babouin choisit d'associer les paires en considérant les relations exprimées (il sélectionne toujours la paire dont les éléments sont identiques, même si elle ressemble moins au modèle), alors que les enfants de huit ans n'y parviennent pas spontanément.

capable d'associer des relations. De nombreux chercheurs considéraient jusqu'alors cette aptitude comme l'apanage de l'homme. C'est elle qui nous permet par exemple de rapprocher la relation qui existe entre un chat et une souris de celle qui existe entre un oiseau et un ver de terre : dans les deux cas, le premier mange le second.

Nous avons élaboré un protocole pour étudier ce type de raisonnement complexe chez le babouin. Dans un premier temps, nous affichons à l'écran une paire de formes identiques ou différentes (la paire « modèle »), que le babouin doit mémoriser et toucher (voir la figure ci-dessus). Nous présentons ensuite deux nouvelles paires de formes aux singes, l'une constituée de deux formes identiques et l'autre de deux formes différentes. Pour obtenir une récompense alimentaire, le babouin doit toucher la paire qui exprime la même relation que le modèle. Après la phase d'apprentissage (trop longue pour être possible avec un dispositif de tests classique), on teste les singes avec de nouvelles formes, qu'ils n'ont jamais vues. Dans ces conditions, quelques babouins réussissent la tâche, ce qui montre leur capacité à établir des relations entre relations : tandis que dans les travaux d'Anthony Wright, les babouins avaient juste besoin de comparer deux objets, ils devaient ici analyser la relation liant les objets de la paire modèle, puis celles existant entre les éléments de chaque paire test, et enfin déterminer que l'une de ces relations était identique au modèle.

Une autre version de cette tâche, plus difficile, consiste à rendre la « mauvaise » paire test – celle que le singe ne doit pas sélectionner – davantage ressemblante au modèle que la bonne (voir la figure ci-dessus).

Le singe a alors le choix entre deux réponses, l'une fondée sur la relation entre les éléments de chaque paire et l'autre sur leur aspect visuel global. Les babouins adoptent de préférence la première stratégie, c'est-à-dire qu'ils font un lien entre les relations.

En 2007, Dedre Gentner, de l'Université Northwestern, aux États-Unis, a soumis des enfants d'âges différents à ce test. Dès quatre ans et demi, les enfants savent associer les relations, mais ils ne le font que si on nomme les paires de formes, éventuellement à l'aide de mots imaginaires. L'expérimentateur montre par exemple la paire modèle et dit : « Regarde, c'est un truffet ! ». Puis, quand l'enfant est confronté aux paires tests, il lui demande : « Lequel, parmi ces deux-là, est aussi un truffet ? ». Lorsqu'on ne nomme pas les paires, c'est-à-dire dans des conditions comparables aux tests chez le babouin, les enfants de quatre et huit ans abandonnent les stratégies relationnelles pour ne regarder que les formes. Les babouins semblent donc avoir spontanément des stratégies cognitives plus complexes dans cette tâche que des enfants en classe de CE2 à qui on ne donne aucune clef verbale.

Les babouins plus doués que des enfants de CE2 ?

Seuls une dizaine de singes sur les 24 individus du groupe ont accompli avec succès cette tâche complexe d'association de relations. De façon générale, nous constatons souvent une grande variabilité entre les animaux. D'où vient-elle ? L'explication réside peut-être dans des différences

l'efficacité des fonctions exécutives. Ces fonctions cognitives permettent, par exemple, de diriger volontairement l'attention vers les éléments pertinents d'un problème, ou de décider de changer de stratégie face à un obstacle. Chez l'homme, plusieurs études ont montré que les caractéristiques de ce contrôle exécutif conditionnent les capacités à raisonner. Si ce système de contrôle est plus ou moins efficace chez les singes, cela expliquerait les différences de performances.



Avec Élodie Bonté et Timothy Flemming, de notre laboratoire, nous avons mis ce postulat à l'épreuve chez le babouin, grâce à des tests sur ordinateur. Nous avons proposé aux singes une tâche dite de Wisconsin, où trois éléments sont affichés à l'écran et où l'animal doit en toucher un selon une règle particulière (par exemple, «toucher l'élément jaune, quelle que soit sa forme»); il apprend cette règle au fil des essais, grâce à l'obtention d'une récompense lors de chaque bonne réponse. Une fois que l'animal a compris la règle à suivre, on la change soudainement. Elle devient par exemple «toucher le triangle, quelle que soit sa couleur». Les singes doivent alors faire preuve de flexibilité cognitive pour s'adapter rapidement.

Nous avons constaté que les babouins y parviennent d'autant mieux qu'ils sont jeunes (voir la figure ci-dessous) – un phénomène également observé chez l'homme. En outre, l'analyse croisée des performances dans la tâche d'association de relations et dans celle mesurant l'efficacité du contrôle exécutif a confirmé que ces caractéristiques sont liées: les singes qui ont la meilleure flexibilité cognitive sont ceux qui réussissent le mieux dans la tâche d'association de relations.

Une source de bien-être

Pour vérifier que les tests ne perturbent pas les babouins, les auteurs les ont entraînés à sucer des cotons, afin de collecter des échantillons de salive. Ils ont mesuré la concentration de cortisol salivaire, une hormone libérée en cas de stress. Cette concentration était plus faible quand les babouins avaient accès aux ordinateurs. Les écrans tactiles leur permettent de diversifier leurs activités, ce qui atténue leur stress et améliore leur bien-être général.

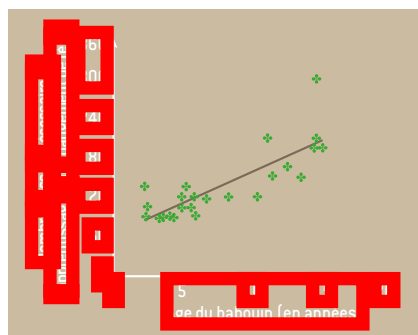


Notre dispositif offre également une occasion unique d'examiner par une démarche expérimentale l'influence des interactions sociales sur les performances cognitives des singes. Dans la nature, ces animaux vivent en troupes hiérarchisées de quelques dizaines à quelques centaines d'individus, qui ont des interactions très riches. À la station de primatologie de Rousset, les babouins forment aussi des groupes sociaux, dont les tests ne les isolent pas.

L'influence du groupe

Au cours de la journée, plusieurs singes travaillent parfois de conserve dans des compartiments de test adjacents, dont les parois sont en Plexiglas transparent, de sorte que chaque individu peut voir ses congénères à l'œuvre. À d'autres moments, seul un babouin est présent, tandis que les autres restent dans l'enclos. On peut donc mesurer l'effet des partenaires sociaux sur les performances des babouins.

Dans une étude à paraître, réalisée avec Pascal Huguet, de notre laboratoire, et Isabelle Barbet, du CNAM (Conservatoire national des arts et métiers), nous avons proposé aux animaux une tâche simple:



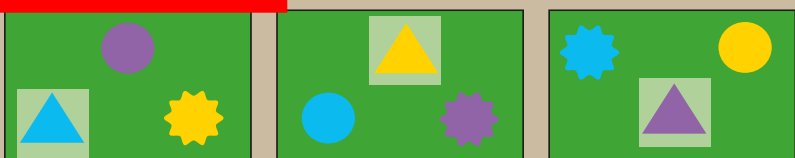
LES « VIEUX » SONT MOINS FLEXIBLES

aussi chez les singes. Dans cette expérience, l'animal doit d'abord toucher l'objet de couleur jaune (ci-dessous, ligne du haut). Puis la règle change: il doit désormais sélectionner le triangle (ci-dessous, ligne du bas). D'autres changements de règle ont lieu, et à chaque fois le nombre d'essais nécessaires pour que le singe se remette à répondre correctement est mesuré. Les jeunes ont besoin de bien moins d'essais que les plus âgés pour apprendre une nouvelle règle (ci-contre).

Règle 1 : sélectionner l'objet jaune



Règle 2 : sélectionner le triangle



Des
dizaines
de milliers d'essais
sont parfois nécessaires
pour un apprentissage.

Si ils voyaient d'abord un rond, ils devaient toucher la forme située à gauche de l'écran lors de l'affichage suivant; si c'était un polygone, ils devaient toucher la forme située à droite (voir la figure ci-dessous). Nous avons montré que la vitesse à laquelle ils répondent est liée à la présence de congénères dans les postes de travail adjacents: cette présence tend à accélérer la réponse, en particulier quand la tâche est bien apprise.

Ce n'est pas tout. Les interactions sociales influent sur les performances cognitives d'une autre façon: en modifiant l'état émotionnel. Chez l'homme comme chez l'animal, les échanges avec autrui apaisent, stressent, excitent, attristent, etc. En 2014, nous avons testé si les interactions spontanées des babouins modifient leurs performances dans des tâches informatisées (voir l'encadré page ci-contre).

Nous avons proposé aux animaux un test où ils devaient reconnaître et toucher un stimulus en forme de T à l'écran, caché au milieu de L d'orientations variées. Parallèlement, nous avons relevé la totalité des comportements sociaux manifestés dans l'enclos. Cette étude a confirmé que les performances sont modifiées par les événements

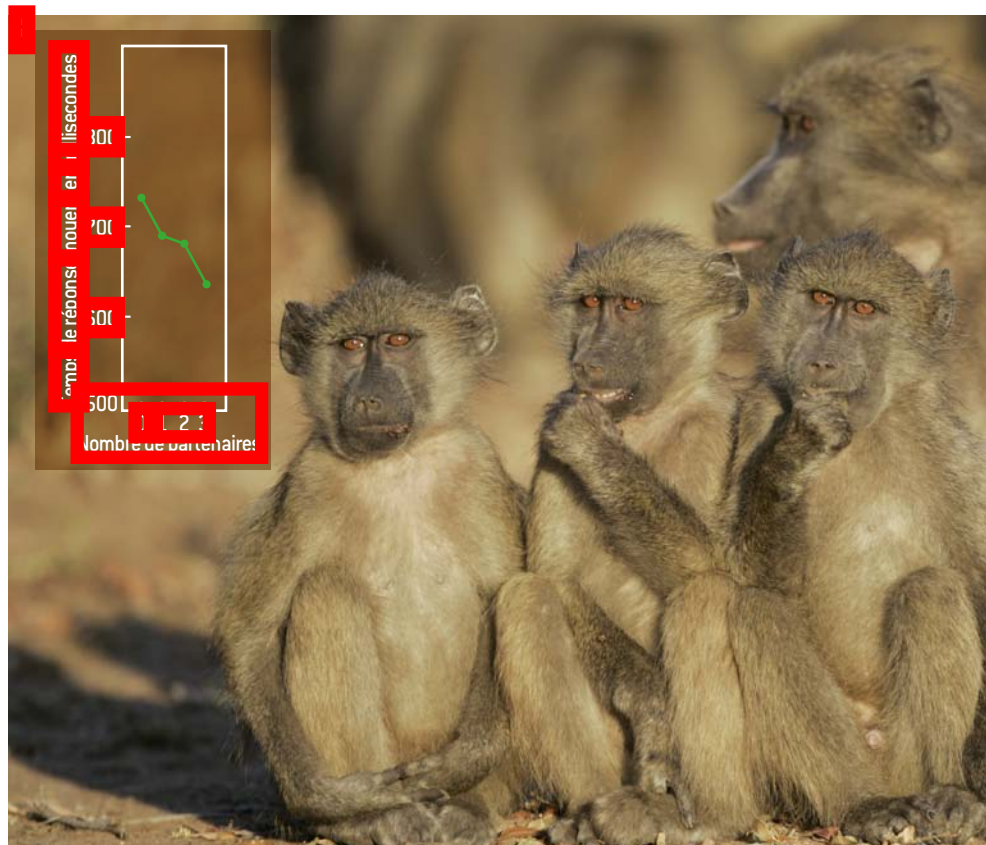
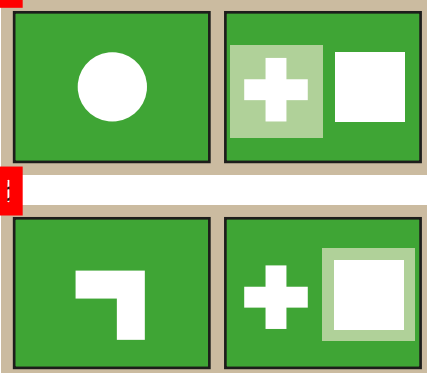
survenus quelques minutes avant la réalisation de la tâche. Ainsi, les singes sont plus rapides pour reconnaître la forme à l'écran après une interaction sociale positive qu'après un échange houleux avec leurs congénères. De même, plusieurs études ont montré l'influence d'échanges stressants sur les performances cognitives chez l'homme.

Nos résultats révèlent une interaction des fonctions cognitives qui gèrent la vie sociale avec celles impliquées dans la résolution de problèmes non sociaux. Jusqu'à présent, peu de travaux ont porté sur cette interaction. Ces données préliminaires montrent tout le potentiel de cette nouvelle approche expérimentale pour l'étude des influences sociales sur la cognition.

Quand les cultures évoluent

En 2014, nous avons aussi étudié un autre aspect de la vie sociale: la transmission culturelle. Ce phénomène, observé chez de nombreux animaux, concerne divers aspects du quotidien: utilisation d'outils, chants particuliers, stratégies de recherche de nourriture... Mais les dépositaires successifs

DES FANFARONS ? Dans le test ci-dessous, quand le premier écran représente un cercle, le babouin doit choisir la croix sur le second (a). Quand c'est d'abord un polygone qui est affiché, le singe doit toucher le carré (b). Après quelques milliers d'essais, les babouins deviennent d'autant plus rapides pour cette tâche qu'ils sont entourés de nombreux partenaires (c).



Vous avez frôlé l'accident en voiture, vous vous êtes

disputé avec un collègue ou vous avez échangé un geste tendre avec votre partenaire ? Vos performances cognitives s'en ressentiront. Avec Yousri Marzouki, Annabelle Goujon et Julie Gullstrand, de notre laboratoire, nous avons étudié si le même phénomène s'observe chez les babouins. Une interaction positive, tel un épouillage (a), les calme-t-elle et améliore-t-elle leurs performances aux tests informatisés ?

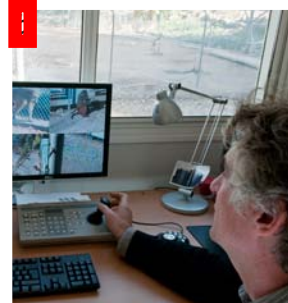
Pour le déterminer, nous avons répertorié toutes les interactions sociales que les singes manifestent spontanément dans leur enclos (b). Nous les avons analysées en corrélation avec les résultats à un test informatisé, où les babouins devaient reconnaître un stimulus en forme de T parmi d'autres éléments.



distracteurs. Cette étude a confirmé que les performances sont modifiées par l'état émotionnel du singe, qui dépend des événements survenus dans son enclos quelques minutes avant

le test. Ainsi, les singes reconnaissent plus rapidement la forme à l'écran après une interaction sociale positive qu'après un échange houleux.

J. F. et A. M.



améliorent-ils peu à peu ce qu'ils reçoivent ? Jusque-là, on n'avait constaté une telle évolution cumulative que chez l'homme...

Avec Nicolas Claidière, de l'Université d'Aix-Marseille, nous nous sommes demandé si les babouins en étaient aussi capables. Nous avons conçu une tâche informatisée où la production d'un participant est utilisée comme entrée pour le participant suivant. Chez l'homme, on applique par exemple cette méthode avec des langages simplifiés : le premier participant doit apprendre un langage puis le transmettre au deuxième, et ainsi de suite. On constate alors, au fil des transmissions, une amélioration des performances (les participants mémorisent de plus en plus fidèlement le langage), une structuration des règles syntaxiques apparaissent et une « spéciation » (chaque chaîne de transmission aboutit à un langage spécifique).

Dans notre étude, une grille comprenant quatre carrés rouges au milieu de douze blancs était présentée à un singe, puis tous les carrés devenaient blancs et l'animal devait toucher l'emplacement de ceux qui étaient rouges auparavant.

Il recevait une récompense s'il avait trois ou quatre bonnes réponses, puis le motif de quatre carrés qu'il avait touché était présenté au participant suivant.

Nous avons observé les trois caractéristiques d'une évolution culturelle cumulative : l'amélioration des performances (les participants successifs réussissaient de plus en plus souvent), la structuration (les motifs évoluaient, finissant fréquemment par se constituer de quatre cases adjacentes) et la spéciation (chaque chaîne de transmission aboutissait à un résultat différent). Les babouins ont donc les capacités cognitives pour faire évoluer ce qu'ils se transmettent.

Nos recherches révèlent l'intérêt d'enrichir le contexte de vie et d'étude de l'animal en laboratoire, et notamment son contexte social. D'autres équipes, au Japon, en Europe et aux États-Unis, se sont inspirées de notre approche et commencent à la mettre en œuvre. Il y a fort à parier que ce nouveau mode d'expérimentation se développera, car il permet l'étude des facultés cognitives dans leurs multiples dimensions, tout en protégeant le bien-être de l'animal.

BIBLIOGRAPHIE

Y. Marzouki et al., Baboons' response speed is biased by their moods, *PLoS One*, vol. 9(7), e102562, 2014.

N. Claidière et al., Cultural evolution of systematically structured behaviour in a non-human primate, *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 281, 2014.

J. Fagot et al., Effects of freely accessible computerized test systems on the spontaneous behaviors and stress level of Guinea baboons (*Papio papio*), *American Journal of Primatology*, vol. 76, pp. 56-64, 2013.

J. Fagot, Une nouvelle procédure d'expérimentation comportementale à l'interface entre les approches « Naturalistes » et « Généralistes » de la cognition du primate, *Revue de primatologie*, vol. 2, 2010.

En 1846, sur les indications d'Urbain Le Verrier, on découvre la planète Neptune. Pour l'astronome français, c'est la gloire. Ses contemporains et successeurs saluent sa performance et en oublient de vérifier la précision qu'il annonce...

Jacques Gappaillart

NEPTUNE

L'erreur de Le Verrier

« Cette étoile n'est pas sur la carte ! » s'exclame le jeune Heinrich d'Arrest sous la coupole de l'Observatoire de Berlin, alors qu'il assiste l'astronome Johann Galle dans une recherche insolite. La scène se déroule le 23 septembre 1846, peu avant minuit à l'heure de la capitale prussienne. Ce jour-là, Galle a reçu une lettre du Français Urbain Le Verrier, dont l'importants travaux en mécanique céleste ont assis l'autorité dans le domaine. Or cette lettre contient des indications sur la position d'une planète inconnue, qui serait responsable d'anomalies constatées dans le mouvement de la planète Uranus. Il n'était

pas dans les habitudes des observatoires de suspendre leurs travaux en cours, surtout pour rechercher un astre hypothétique issu de spéculations mathématiques. Pourtant, Galle s'est montré persuasif et a obtenu de son directeur, Johann Encke, l'autorisation d'entamer la recherche le soir même.

Dans la région du ciel à explorer, Galle ne détecte d'abord aucune « étoile » qui présenterait un diamètre apparent, et qui pourrait donc être la planète cherchée. Par ailleurs, aucune carte céleste dont dispose l'observatoire ne semble appropriée à cette recherche. D'Arrest suggère alors de regarder si, parmi les toutes nouvelles cartes de

Carl Bremiker éditées par l'Académie de Berlin et non encore diffusées, il ne s'en trouverait pas une qui couvrirait la partie du ciel où Le Verrier situe sa planète. C'est le cas ! Grâce à cette carte plus détaillée, la recherche est de courte durée. Bientôt, Galle énonce les coordonnées d'une étoile qu'il voit dans le champ de sa lunette et qui ne figure pas sur la carte. Le temps de vérifier, la nuit suivante, que l'étoile en question s'est bien déplacée par rapport à ses voisines, et qu'elle n'est donc pas une étoile, Galle écrit à Le Verrier, le 25 septembre : « Monsieur, la planète, dont vous avez signalé la position, *réellement*



GRACE

aux calculs

l'Urbain Le Verrier l'ai

entre avec Francois Arago.

le bout, et Alexis Bouvard, assis l

Johann Galle l'a droite l. A

l'Observatoire de Berlin, découvre

Neptune. Cette allégorie est une

esquisse d'Edmond Louis Dupain

pour le plafond de la rotonde

ist de l'Observatoire de

Paris 1889

L'AUTEUR



Jacques GAPAILLARD est professeur honoraire à l'Université de Nantes où il a enseigné les mathématiques et l'histoire de l'astronomie, et est chercheur associé au Centre François Viète de cette université.

« existe. » Cette planète reçoit bientôt le nom de Neptune.

Ce récit, les historiens de l'astronomie le connaissent bien. Plusieurs générations d'astronomes l'ont transmis dans ses grandes lignes, soulignant la précision du calcul de Le Verrier, qui avait permis de pointer la bonne région du ciel pour découvrir Neptune. Cependant, quelques mois après la découverte, avec les nouvelles observations de la planète accumulées, les astronomes disposaient d'une orbite de Neptune montrant que la façon dont Le Verrier avait estimé son « erreur » sur la position réelle de Neptune – l'écart entre les positions prévues et observées de la planète – n'était plus admissible. Malgré cela, ses contemporains et successeurs ont continué de s'appuyer sur son estimation sans la remettre en question. Pire, ils se sont trompés sur sa signification. La faute a non seulement contribué au succès de Le Verrier, mais s'est depuis propagée dans de nombreux écrits...

Revenons en arrière. Quand, le 23 mars 1781, l'astronome anglais William Herschel a découvert Uranus, plusieurs astronomes ont dressé des tables censées prévoir les positions futures de cette planète, mais elles se révélaient toutes en défaut après quelques années. Alexis Bouvard, l'auteur d'une de ces tables, évoque la possibilité « de quelque action étrangère ou inaperçue, qui aurait agi sur la planète ». En fait, il pense à l'influence d'une planète inconnue dont l'orbite serait située au-delà de celle d'Uranus.

« Au bout de sa plume »

Au cours de l'été 1845, François Arago, directeur des observations de l'Observatoire de Paris, incite Le Verrier à examiner la question. L'étude le conduit à rechercher, par le calcul, la planète supposée responsable des perturbations résiduelles d'Uranus. Ce problème est d'un type nouveau. Les

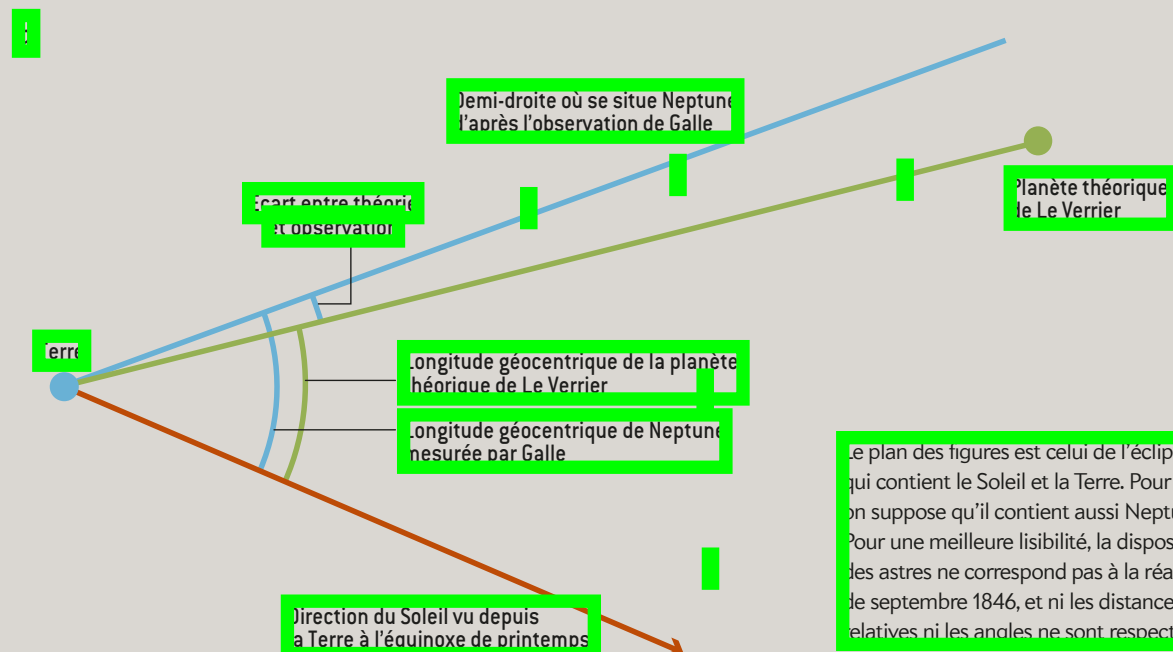
UNE SUPPOSITION OSEE

Peu après la découverte de Neptune grâce à ses calculs, Le Verrier a voulu évaluer la précision de sa prédiction en déterminant l'écart entre les positions théorique et observée de la planète.

L'observation faite par Galle déterminait seulement une demi-droite issue de la Terre, sur laquelle se trouvait Neptune à une distance inconnue (a , en bleu). On en déduit la longitude géocentrique de Neptune – l'angle qui sépare cette demi-droite d'une direction de référence (la direction où est vu le Soleil depuis la Terre lors

de l'équinoxe de printemps, en rouge). Le Verrier aurait pu comparer cette longitude géocentrique à celle de sa planète théorique, déductible de ses calculs. Le 28 septembre 1846, c'est d'ailleurs cet écart en longitude géocentrique que lui a transmis Encke : $54.7'$.

Cependant, Le Verrier a choisi de calculer un autre écart : celui en longitude héliocentrique, c'est-à-dire par rapport au Soleil. Les calculs de Le Verrier permettaient d'obtenir la longitude héliocentrique de la planète théorique. Celle de la planète réelle était en revanche hors de



Le plan des figures est celui de l'écliptique, qui contient le Soleil et la Terre. Pour simplifier, on suppose qu'il contient aussi Neptune. Pour une meilleure lisibilité, la disposition des astres ne correspond pas à la réalité de septembre 1846, et ni les distances relatives ni les angles ne sont respectés.

astronomes savaient calculer les perturbations exercées par une planète B connue sur une planète A. Mais le problème inverse, consistant à déterminer une hypothétique planète B qui serait responsable de perturbations constatées dans la marche d'une planète A, n'avait encore jamais été abordé. C'est du moins ce que croit Le Verrier, car, alors qu'il se met au travail, il ne sait pas qu'un jeune Anglais, John Adams, a presque achevé la première version d'une étude similaire dont il n'a rien publié. Malheureusement pour Adams, ce sont les calculs de Le Verrier, et non les siens, qui conduiront à la découverte de Neptune.

À la différence d'Adams, Le Verrier avait fait part au monde scientifique de l'avancement de ses travaux. Le 31 août 1846, il annonce à l'Académie des sciences de Paris ses dernières conclusions sur l'orbite et la position de la planète hypothétique, et le 18 septembre, il les transmet à Galle, avec la suite heureuse que l'on sait. Alors que

L'ESSENTIEL

Le 23 septembre 1846, un astronome berlinois découvre une nouvelle planète, Neptune, d'après les calculs de Le Verrier.

Le Verrier estime l'écart entre les positions observée et prédite à moins de un degré.

Tout à leurs félicitations, les contemporains évaluent ce résultat pourtant incorrect et lui donnent même une autre signification.

Cette erreur s'est perpétuée jusqu'à aujourd'hui...

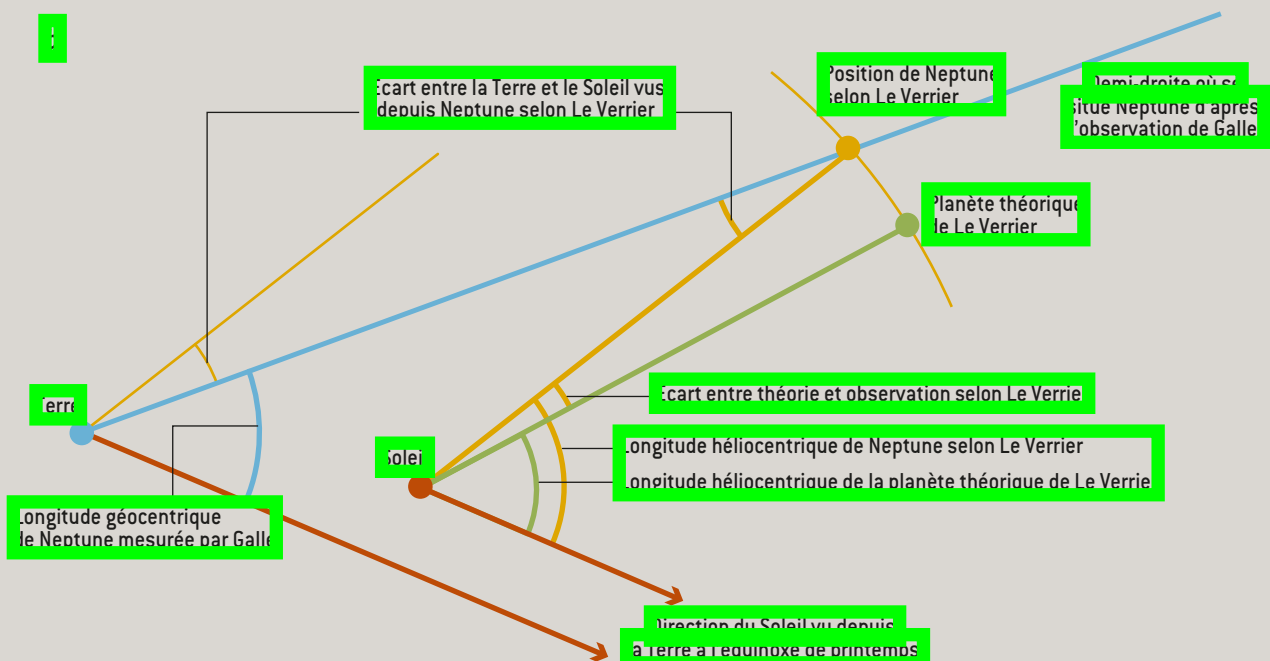
Herschel a rencontré Uranus par hasard, au cours d'observations systématiques, Le Verrier a accompli l'exploit inédit de trouver une planète par le calcul, non en observant le ciel, mais « au bout de sa plume », selon la formule d'Arago.

On se doute que Neptune n'a pas été trouvée exactement là où les calculs de Le Verrier la situaient, mais il fallait que la prédiction fût assez précise pour avoir permis une découverte si rapide. Quelle « erreur » Le Verrier a-t-il commise sur la position réelle de Neptune ? Le 5 octobre 1846, l'astronome répond lui-même à cette question devant l'Académie des sciences. Le résultat de son calcul, dont il ne livre que le schéma (voir la figure page 72), est que Neptune a été trouvée à seulement 52 minutes d'angle (52'), en longitude héliocentrique, de sa position prédite. Il conclut : « Ainsi la position avait été prévue à moins d'un degré près. »

La performance est remarquable, mais le calcul de Le Verrier présente un défaut

portée juste après sa découverte : la longitude héliocentrique de Neptune était la somme de sa longitude géocentrique et de l'écart entre la Terre et le Soleil vus depuis Neptune (b , en jaune) – l'angle que Le Verrier nomme la réduction au lieu héliocentrique (voir la figure en haut de la page 72). Or l'ignorance de la distance Terre-Neptune (et donc Soleil-Neptune) interdisait d'accéder à cet angle. Pour connaître cette distance, il aurait fallu disposer d'observations de Neptune sur plusieurs mois afin que son orbite soit calculable.

Le Verrier contourna la difficulté en effectuant une hypothèse osée : supposa que Neptune se trouvait à la même distance du Soleil que la planète théorique. C'est ainsi qu'il obtint son écart en longitude héliocentrique de 52'. Mais lorsque, quelque temps plus tard, d'autres observations de Neptune montrèrent que cette hypothèse n'était pas acceptable, qui aurait osé contester un calcul du grand astronome, devenu la gloire de l'astronomie française et qui, à partir de 1854, régna en despote à l'Observatoire ?



Temps moyen de Berlin septembre 23 – 12 ^h 0 ^m 14 ^s	Ascension droite observée	328° 19' 16"
	Déclinaison observée	- 13. 24. 8
	Longitude géocentrique conclue	325. 53
	Réduction au lieu héliocentrique	0. 59
	Longitude héliocentrique au 23 sept	126° 52'
Mouvement en 0.275 année		11
Longitude héliocentrique conclue au 1 ^{er} janvier 1847		127° 24'
Longitude déduite des perturbations, et donnée dans le <i>Compte rendu</i> du 31 août 1846		126. 32
Différence		1° 52'

LE 5 OCTOBRE 1846, Le Verrier présenta à l'Académie des sciences les grandes lignes du calcul qu'il avait effectué pour estimer à 52' son « erreur » sur la position de Neptune (l'écart entre les positions théorique et observée de la planète). Partant de l'observation faite à Berlin le 23 septembre, il déduisit la longitude géocentrique de la planète, qu'il transforma en une longitude héliocentrique. Enfin, il estima l'erreur en comparant les longitudes héliocentriques théorique et réelle de la planète au 1^{er} janvier 1847, ce qui a peu d'incidence sur le résultat. En revanche, dans le cas présent, passer d'une longitude géocentrique à une longitude héliocentrique n'était pas aussi simple qu'il le suppose ici...

assez gênant. L'astronome l'a effectué sous l'approximation que Neptune se trouverait dans le plan de l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre) à la date considérée, ce qui était presque le cas. Comme la planète théorique est elle aussi située dans ce plan – une hypothèse simplificatrice que Le Verrier a dû faire pour rendre praticable sa recherche –, les 52' représentent l'écart angulaire qui séparerait les deux planètes si elles avaient été observées depuis le Soleil. Mais ce calcul recèle une difficulté.

In calcul impossible

À la date considérée, Le Verrier dispose de la longitude héliocentrique de la planète théorique. Il lui reste à obtenir celle de Neptune, puis à faire la différence. Mais quand une planète vient d'être découverte, il est impossible de connaître la distance qui la sépare de la Terre et, par suite, du Soleil. Pour y parvenir, il faut disposer d'au moins trois observations de la planète assez espacées dans le temps. L'observation au moment de la découverte définit seulement une demi-droite, issue (du centre) de la Terre, sur laquelle se situe la planète (voir la figure a de l'encadré pages 70 et 71), et cette seule information ne permet pas de déterminer sa longitude héliocentrique.

Ainsi, à l'époque de la découverte, la comparaison des positions des deux planètes – théorique et observée – ne pourrait être que géocentrique. D'ailleurs, le 28 septembre 1846, c'est un écart de 54,7'

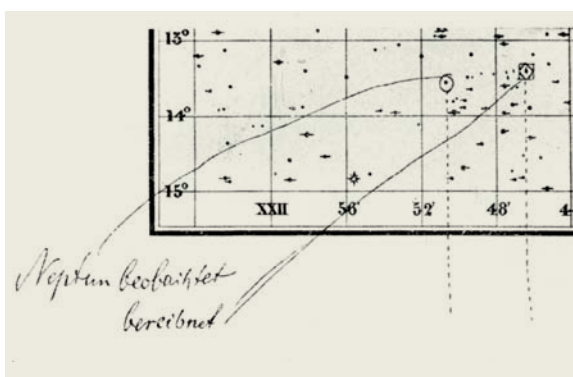
en longitude » que Encke a transmis à Le Verrier, sans préciser qu'il s'agissait de longitude géocentrique, puisque c'était la seule correctement envisageable.

Alors, comment Le Verrier a-t-il obtenu son résultat ? Tout simplement en substituant la distance inconnue Neptune-Soleil celle qu'il avait calculée pour sa planète théorique (voir la figure b de l'encadré pages 70 et 71), comme le montre la reconstitution du détail de son calcul. Dans ces conditions, à quoi correspondent ses 52' ? Certainement pas à ce qu'elles prétendent être. Il ne peut s'agir de l'écart entre les valeurs théorique et observée d'un même paramètre puisque la théorie, aussi utilisée pour localiser Neptune, intervient ici dans chacun des deux termes de la différence. En fait, ces 52' représentent l'erreur dont serait entachée la longitude héliocentrique prévue par Le Verrier, dans le seul cas où il n'en aurait commis aucune sur la distance de la planète au Soleil. À l'issue

de son calcul, Le Verrier pouvait tout au plus conclure que l'erreur commise sur cette coordonnée de Neptune était probablement de l'ordre du degré, mais la précision des 52' était illusoire.

On comprend toutefois pourquoi Le Verrier a procédé de cette façon peu orthodoxe. Avant même la découverte de la planète, il avait affiché une confiance impressionnante dans la précision de ses calculs, et le succès rapide des recherches de Galle ne pouvait que le conforter dans cette idée. Il s'est donc empressé de déterminer l'écart entre les positions observée et calculée par la méthode qui lui a semblé la plus commode, même si elle exigeait de substituer, à une distance réelle inconnue, celle qui provenait de sa théorie. Pour lui, les deux distances devaient être quasi identiques.

Le Verrier aurait d'ailleurs eu tort de se priver de cette commodité, puisque personne n'a rien trouvé à y redire. Ainsi,



SUR LA CARTE HORA XXI

de Carl Bremker, qui a servi à la découverte, sont indiquées les positions de « Neptune observée (beobachtet) » et de « Neptune calculée (berechnet) ». D'après leurs coordonnées sur la carte, elles sont écartées d'environ 1° 03', ce que confirme le calcul.

En 1847, l'astronome et académicien Jean-Baptiste Biot rapporte son écart de 52' sans la moindre objection et, en 1849, John Herschel, astronome comme son père, le découvreur d'Uranus, écrit : « La longitude géocentrique déterminée par le Dr Galle, d'après [son] observation, était 325° 53', qui, convertie en héliocentrique, donne 326° 52', différant de 1° 52' de la position désignée par M. Leverrier. » La « conversion » hardie effectuée par Le Verrier ne lui pose aucun problème.

Si le procédé de Le Verrier a pu paraître tolérable aussi longtemps que rien n'est venu contredire ses résultats, la situation change dès février 1847. À cette époque, profitant à la fois des dernières observations de Neptune et d'une autre effectuée en 1795 par Jérôme Lalande, qui croyait avoir affaire à une étoile, l'Américain Sears Cook Walker est en mesure de calculer l'orbite elliptique de la nouvelle planète. Or cette orbite se révèle notablement différente de celle qu'avait prévue Le Verrier.

Ce dernier avait conclu que l'orbite elliptique avait un demi-grand axe de 36,1539 unités astronomiques (soit environ 36 fois le demi-grand axe de l'orbite terrestre) et une excentricité de 0,10761. Walker, lui, estime ces paramètres respectivement à 30,2504 unités astronomiques et 0,00884. Ces disparités jettent un doute

Le Verrier aurait eu tort de se priver de son hypothèse simplificatrice : personne n'a rien trouvé à y redire.

sur la validité de la théorie de Le Verrier et l'Américain Benjamin Pierce va même jusqu'à déclarer que la découverte de Neptune doit « être regardée comme un heureux hasard » ! Toujours est-il que le calcul des 52' de Le Verrier n'est plus acceptable.

D'ailleurs, en 1852, s'appuyant sur les résultats de Walker, l'Écossais Robert Grant obtient un écart en longitude héliocentrique

de 57'. Pourtant, des astronomes tels que François Arago (1857), Edmond Dubois (1865) ou encore Camille Flammarion dans son *Astronomie populaire* (1880) continuent de mentionner le résultat de Le Verrier sans la moindre objection. Et ce alors qu'une nouvelle erreur est venue entre-temps se superposer à la précédente.

« [Galle] dirigea une lunette vers le point du ciel indiqué par M. Leverrier, et y vit en effet la planète annoncée [...] : le lieu qu'elle occupait réellement était éloigné de moins d'un degré de la position que la théorie lui avait assignée. »

Cette phrase est extraite du *Cours élémentaire d'astronomie* (1853) de Charles Delaunay, qui doit avoir en tête les 52' de Le Verrier. Mais s'il sait très bien qu'il s'agit d'un écart en longitude héliocentrique, ce n'est pas ce qu'il écrit : son texte signifie, en fait, que dans le ciel de Berlin, la position où Galle a vu Neptune était séparée de celle prévue par Le Verrier d'une distance angulaire (géocentrique !) inférieure à un degré.



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 œuvre
- 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

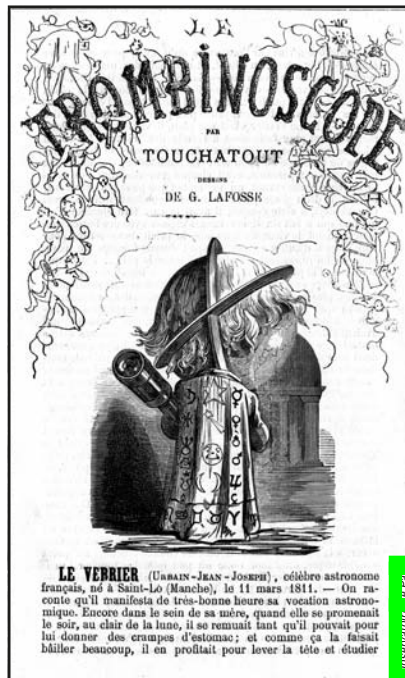
contact@cnrs.fr 01 69 82 44 55

Or ce qui, chez Delaunay, n'est peut-être qu'une maladresse de langage se retrouve plus tard sous des plumes aussi savantes que celles de Simon Newcomb (1878), Félix Tisserand (1889) ou encore André Danjon (1946). Ces prestigieux auteurs ont tous écrit, sans aucune ambiguïté, que Galle a observé Neptune à moins de 1° – ou même à $52'$ – de la position indiquée par Le Verrier. L'écart en longitude héliocentrique s'est changé en une simple distance angulaire sur la voûte céleste, mesure naturelle de l'« erreur » commise par Le Verrier et qui, d'une certaine façon, a été « observée » à Berlin.

C'est d'ailleurs au calcul de cette distance angulaire que l'on s'attendait de la part de Le Verrier, et cela d'autant plus qu'à l'inverse de l'écart en longitude héliocentrique, elle était accessible à l'époque de la découverte. En se référant au repère géocentrique, les formulations gagnent en simplicité et en crédibilité, avec toutefois l'inconvénient majeur... d'énoncer des contrevérités. Car contrairement à ce qui est affirmé, la distance angulaire en question n'était pas inférieure au degré. Un calcul que Le Verrier et ses successeurs pouvaient facilement effectuer montre qu'elle était d'environ $1^{\circ} 03'$, en accord avec les indications portées sur la carte céleste utilisée à Berlin (voir la figure en bas de la page 72). Notons que cette distance angulaire dépasse l'écart en longitude géocentrique ($54,7'$). Cette différence est due au fait que Neptune n'était pas exactement sur l'écliptique (sa latitude géocentrique était non nulle).

Ine faute d'une étonnante longévité

Il est invraisemblable que personne n'ait noté le défaut du calcul des $52'$ par Le Verrier, au moins à l'époque. Mais il faut reconnaître que chicaner sur un point de détail, sans incidence sur l'énorme travail accompli, celui que la découverte de Neptune venait de propulser sur le devant de la scène scientifique, aurait été mal perçu. Arago avait donné le ton en déclarant que « cette découverte restera un des plus magnifiques triomphes des théories astronomiques, une des gloires de l'Académie, un des plus beaux titres de notre pays à la reconnaissance et à l'admiration de la postérité », et de semblables propos furent entendus à l'étranger. En résumé, comme l'a écrit plus tard Danjon, « l'enthousiasme



SI LE SUCCES DE LE VERRIER fut salué, il n'accrut pas le nombre de ses amis, et la presse ne se priva pas de quelques caricatures bien senties, telle celle-ci, publiée en 1872 dans *Le Trombinoscope*. Mais personne ne songea à remettre en cause son calcul des $52'$.

SUR LE WEB

L'Observatoire de Paris consacre une belle exposition virtuelle à Le Verrier : <http://expositions.obspm.fr/leverrier/index.html>

BIBLIOGRAPHIE

J. Gapaillard, By how much did Le Verrier err on the position of Neptune?, *Journal for the History of Astronomy*, sous presse.

J. G. Hubbell et R. W. Smith, Neptune in America: Negotiating a discovery, *Journal for the History of Astronomy*, vol. 23, pp. 261-291. 1992.

J. Lequeux, Le Verrier. Savant magnifique et détesté, ODP Sciences/Observatoire de Paris. 2009.

ne connut pas de bornes». Le Verrier fut comblé d'honneurs. Notamment, en 1846, la Royal Society lui décerna la prestigieuse Copley Medal et, en 1854, il prit la tête de l'Observatoire de Paris.

Quant à ceux qui ne se sont pas aperçus de l'erreur, victimes du poids de l'autorité de Le Verrier, ils n'avaient pas pensé à vérifier le bien-fondé d'une affirmation émanant d'une sommité scientifique.

Il est plus inattendu, en revanche, que ces $52'$ aient été présentées par la suite – et le soient encore aujourd'hui – comme la distance angulaire entre les deux positions planétaires sur la sphère céleste. Dans ce cas encore, la source primaire est tombée dans l'oubli, mais l'erreur n'est pas le produit d'un seul acteur. Il s'agit plutôt d'une tradition qui s'est installée au fil des décennies, acquérant d'autant plus de force qu'elle était relayée par d'éminents astronomes. Rien d'étonnant, dans ces conditions, que leurs successeurs continuent à tomber dans le piège que leur tend cette tradition fautive.

L'histoire de l'astronomie moderne est émaillée de différents types d'erreurs ayant persisté de nombreuses années. Par exemple, des observations surinterprétées, qui ont fait croire à l'existence d'un satellite de Vénus, ou de canaux sur Mars. Ou des erreurs dues à l'insuffisance des connaissances théoriques de l'époque – par exemple la recherche de la planète Vulcain, que Le Verrier croyait responsable de l'avance du périhélie de Mercure par rapport aux prévisions de la mécanique céleste, alors qu'il s'agit d'un phénomène relativiste. Ou encore des erreurs historiques comme celle de l'attribution de la théorie de l'expansion de l'Univers à Edwin Hubble en 1929 et non à Georges Lemaître, qui l'a pourtant devancé de deux ans.

Cependant, les inexactitudes sur l'« erreur » de Le Verrier sont d'une toute autre nature. Il s'agit ici d'astrométrie classique. Les erreurs commises ont perduré au-delà d'un siècle et demi, alors qu'elles auraient pu être détectées dès l'origine. Sans doute s'agit-il d'erreurs sans incidence, anecdotiques par rapport à l'événement considérable que fut la découverte de Neptune. Il reste que ces défauts mettent en lumière un curieux dysfonctionnement d'une communauté scientifique. Malgré la nature numérique de l'erreur scientifique, les inexactitudes ont été entretenues par ceux-là mêmes qui semblaient pourtant tout désignés pour les pointer du doigt... Le cas est-il unique ?

Offre spéciale SCIENCE

POUR LA

réservée à nos lecteurs



1 an d'abonnement à l'Offre Passion

70,39 € au lieu de 102,80 € prix de vente au numéro

12 numéros Pour la Science +

le livre *Incertitudes sur le climat*

de Katia et Guy Laval 19,60 € tarif public

éd. Belin / Pour la Science 2013 - 272 pages - 140 x 220 mm



89,99 €

seulement
au lieu de 122,40 €
ou 76 € l'abonnement seul



BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA
SCIENCE

Service abonnements - Libre réponse 911 382-75 281 - Paris Cedex 11

☐ **OUI, je souhaite bénéficier cette offre spéciale au prix de 89,99 €* au lieu de 122,40 €, prix de vente public.** Cette offre couplée comprend le livre *Incertitudes sur le climat* (1CLIMA) et 1 an d'abonnement **Passion** incluant le magazine *Pour la Science* (12 n°s) + le hors-série *Dossier Pour la Science* (4 n°s) + l'accès numérique offert aux n°s recus.

☐ **Je souhaite m'abonner uniquement à l'Offre Passion du magazine Pour la Science** (12 n°s + 4 hors-séries)

pendant 1 an au prix de 76 €* au lieu de 102,80 € prix de vente au numéro

Pour un abonnement à l'étranger, participation aux frais de port à ajouter pour les 2 offres : Europe 16 €, autres pays 35 €

Les coordonnées

Nom : _____ Prénom : _____
Adresse : _____
Ville : _____ Pays : _____ Code postal : _____
Tél. : _____
Pour la livraison (facultative)

Mon e-mail pour recevoir la Newsletter Pour la Science : _____

Mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire N° _____

Date d'expiration _____

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 un exercice ou à un accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science ou 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.



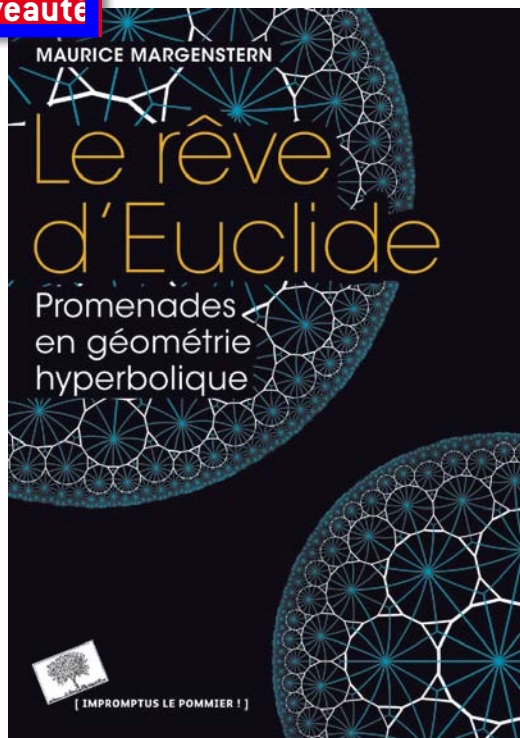
154518 Offre réservée aux abonnés

La sélection de livres

POUR LA SCIENCE

Quel rêve a fait Euclide ? 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.

Nouveauté



Le rêve d'Euclide

Promenades en géométrie hyperbolique

Maurice Margenstern

Réf.74650775

Tout commence, 300 ans avant notre ère, avec Euclide et son fameux axiome « Par un point du plan pris hors d'une droite, il passe dans ce plan exactement une parallèle à cette droite. » Or, cet axiome sonne plutôt comme un théorème, et un théorème, pour tout mathématicien qui se respecte... ça se démontre !

Et les ennuis commencent pour des générations entières de mathématiciens, qui, les uns après les autres, vont s'épuiser dans d'impossibles démonstrations.

Il faudra attendre le XVII^e siècle pour que certains esprits plus libres, plus inventifs, adoptent un point de vue libérateur où, par un point du plan pris hors d'une droite, il passe... deux parallèles à cette droite ! Du jamais vu !

Bienvenue en géométrie hyperbolique, un monde qui a inspiré autant les mathématiciens que les artistes, et qui a initié le développement de l'informatique. Rien que cela !

Éditions Le Pommier 2015
24 pages – 25 € - 978-2-7465-0775-3



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
60 pages – 22,90 € - 978-2-7011-9206-2

in partenariat avec les éditeurs

Belin:
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777

Le Pommier

Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie

ou en renvoyant le bon de commande ci-contre.

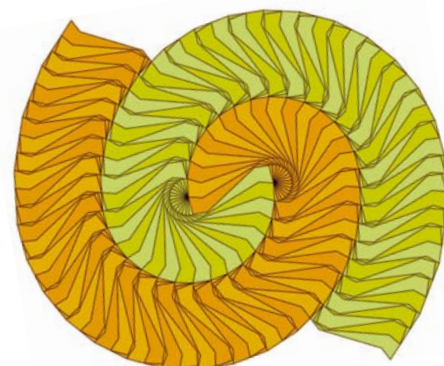
Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

LOGIQUE & CALCUL

Le défi de la sixième couronne

Une figure plane peut-elle paver une grande surface sans qu'il lui soit possible de paver le plan tout entier ? Ce problème dit de Heesch est posé depuis 1968.

Jean-Paul DELAHAYE



Les mathématiciens s'intéressent aux pavages du plan par des formes géométriques aussi simples que possible. Ils les classent en considérant leur symétrie, et conçoivent des algorithmes qui en découvrent de nouveaux, étudient les formes n'autorisant que des motifs apériodiques, etc. À côté de ces problèmes classiques, certains traitent non pas ce qui se passe sur le plan entier, mais ce qui se passe localement autour d'un point ou d'un pavé : ce sont les problèmes d'entourages. Nous en présenterons deux. Le premier est

aujourd'hui résolu. Le second, malgré des progrès réguliers, reste mystérieux.

Commençons par une énigme élémentaire en apparence. On se donne une forme plane, un pavé P . Pouvons-nous l'entourer totalement d'une couronne composée de copies de P , en ne laissant aucun espace libre entre les différents pavés utilisés ? Quel est le nombre minimal de copies de P nécessaire à un tel entourage ?

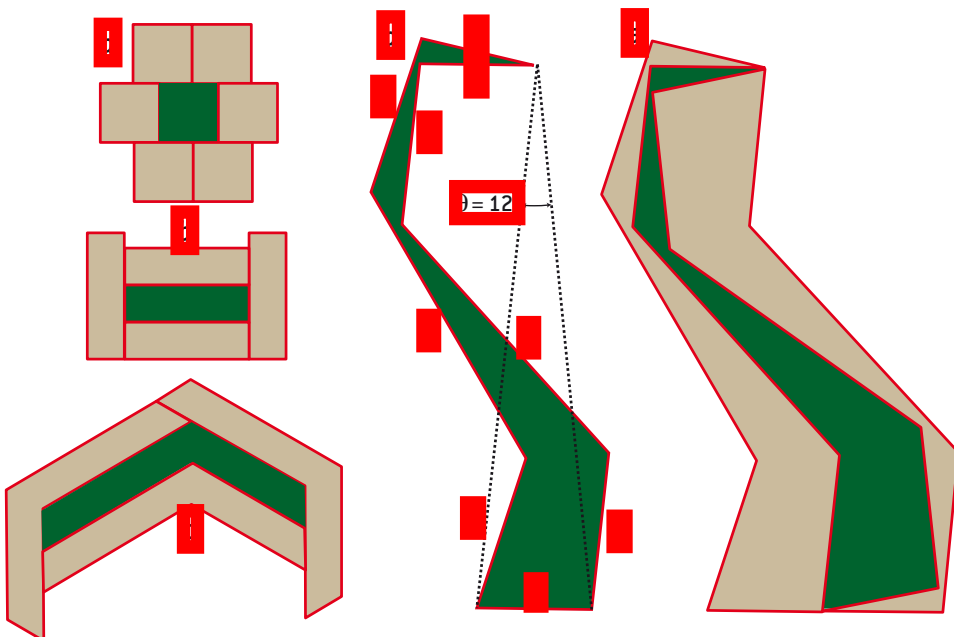
Un pavé carré s'entoure sans mal de six carrés identiques (*ci-dessous, a*), et c'est le minimum ; mieux, tout rectangle (non carré) s'entoure de quatre copies de lui-même (*b*) :

mieux encore, certains pavés s'entourent avec seulement trois copies d'eux-mêmes (*c*).

Évitons tout malentendu sur le mot couronne. La couronne qui entoure un pavé P doit avoir une certaine épaisseur non nulle e : la distance minimum entre un point extérieur aux pavés et un point du pavé central P doit toujours être supérieure à e . Des pavés autour d'un pavé P (ou d'un ensemble E de pavés) sont considérés comme une couronne pour P (ou pour E) si la suppression d'un seul pavé de la couronne met en contact l'extérieur de la zone pavée avec le pavé central (ou avec E).

PEUT-ON ENTOURER PARFAITEMENT

un pavé avec des copies de lui-même ? Le dessin *a* montre un pavé carré entouré par une couronne de six carrés ; pour un rectangle, quatre copies suffisent (*b*). Certains pavés sont entourés en n'utilisant que trois exemplaires d'eux-mêmes (*c*). Peut-on trouver un pavé dont deux copies suffisent à lui composer une couronne d'épaisseur non nulle ? Le problème a été résolu par Casey Mann, qui a utilisé une famille de pavés découverts en 1936 par Heinz Voderberg. Le polygone à neuf côtés de Voderberg (*d*) pave le plan de manière apériodique, mais aussi en formant une spirale (*ci-dessus, à côté du titre*). Deux copies du pavé de Voderberg peuvent l'entourer (*e*), et même entourer deux exemplaires collés du pavé (*f*). Cependant, la couronne ainsi formée est infiniment mince en deux points, ce qui n'est pas satisfaisant. Casey Mann a corrigé ce défaut en modifiant la forme du pavé de Voderberg (*a, b et i*).



Pour savoir s'il est possible d'entourer un pavé P par une couronne de deux pavés P , prenez un papier et un crayon et essayez ! (Voir la figure ci-dessous si vous n'y parvenez pas.)

Le pentagone de Heesch : une seule couronne

Le second problème d'entourage qui va nous occuper a pour origine un petit ouvrage allemand publié en 1968, où le mathématicien Heinrich Heesch (1906-1995) formulait une remarque inattendue. Il présentait un pentagone dont les angles sont $90^\circ, 150^\circ, 90^\circ, 150^\circ$ et 60° et ayant l'étrange propriété suivante : une copie du pentagone de Heesch s'entoure parfaitement, sans chevauchement ni espace laissé vide, par six, sept ou huit copies de lui-même formant une couronne, et pourtant il est impossible de réaliser une seconde couronne autour de la première. On vérifie sans mal que les exemples a , b et c de la figure ci-dessous n'ont pas cette propriété : dans chaque cas, il est possible de construire une seconde couronne autour de la première, et même une troisième... ainsi de suite.

Le pentagone de Heesch réussit donc à paver parfaitement une certaine aire du plan, mais celle-ci est limitée et il est

impossible de prolonger le pavage partiel pour rendre l'entourage plus épais (voir la figure page 80).

Prouver qu'on ne peut pas faire de deuxième couronne exige un raisonnement rigoureux où il faut énumérer soigneusement un grand nombre de cas. Pour se convaincre du résultat, le plus simple est de découper des pavés en carton et d'essayer ; au bout de quelques minutes, vous n'aurez plus aucun doute sur l'impossibilité d'une seconde couronne ! Bien sûr, aujourd'hui, on s'aidera aussi de programmes informatiques qui feront systématiquement les essais de construction et garantiront l'impossibilité d'une nouvelle couronne sans trop de fatigue... pour le mathématicien.

En réalité, le pavé de Heesch n'était pas le premier. On s'est en effet aperçu qu'un pavé proposé en 1928 par le mathématicien allemand Walther Lietzmann, qui a la forme d'une goutte d'eau, a la même propriété. On peut l'entourer avec six copies, mais la couronne ainsi faite est impossible à entourer une seconde fois (figure page 80, b).

On s'est alors demandé si l'on pouvait faire mieux : trouver des pavés admettant non plus une couronne, mais deux, voire plus, sans pour autant que le pavage du plan entier soit possible.

Cela conduit à la définition suivante : le nombre de Heesch d'un pavé P est égal à n si P s'entoure parfaitement de n couronnes d'épaisseur non nulle et faites de copies de P , mais ne peut pas l'être par $(n+1)$ couronnes.

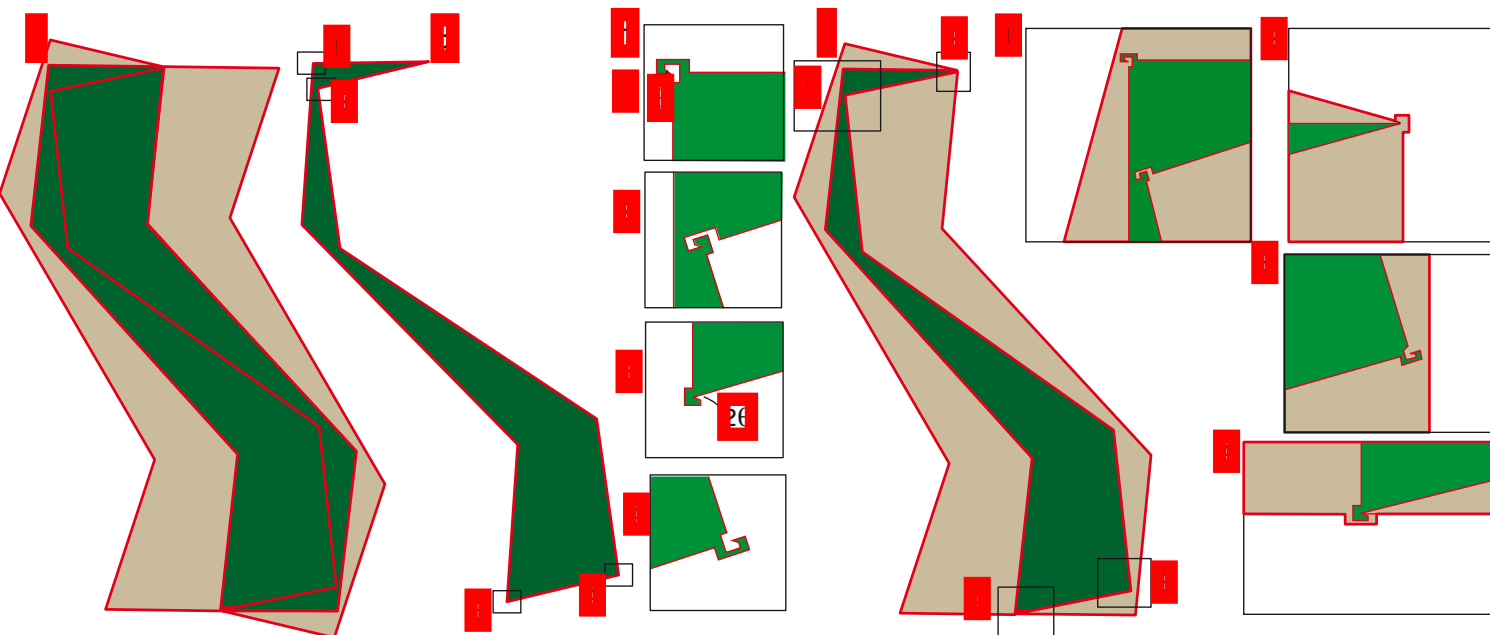
Si aucune couronne n'est faisable, le nombre de Heesch est 0. Lorsqu'un pavé P peut être entouré de n couronnes pour tout n , le nombre de Heesch de P est infini.

Plus le nombre de Heesch est grand, plus la surface pavable par le pavé est grande. Le problème est l'étude des formes qui réussissent à paver de grandes surfaces sans paver tout le plan.

Pavés dont le nombre de Heesch vaut 1

Les figures ayant un nombre de Heesch égal à 1 sont toutes intéressantes, et en trouver demande astuce et imagination. Le Japonais Yoshio Agaoka a découvert en 2005 une forme régulière symétrique ayant un nombre de Heesch égal à 1. C'est le polygone convexe à sept côtés, un heptagone, dont les angles sont $60^\circ, 160^\circ, 160^\circ, 100^\circ, 100^\circ, 160^\circ$ et 160° (figure page 80, c).

On démontre qu'un heptagone convexe ne peut pas paver le plan tout entier. L'heptagone de Agaoka, notons-le HA, a donc un

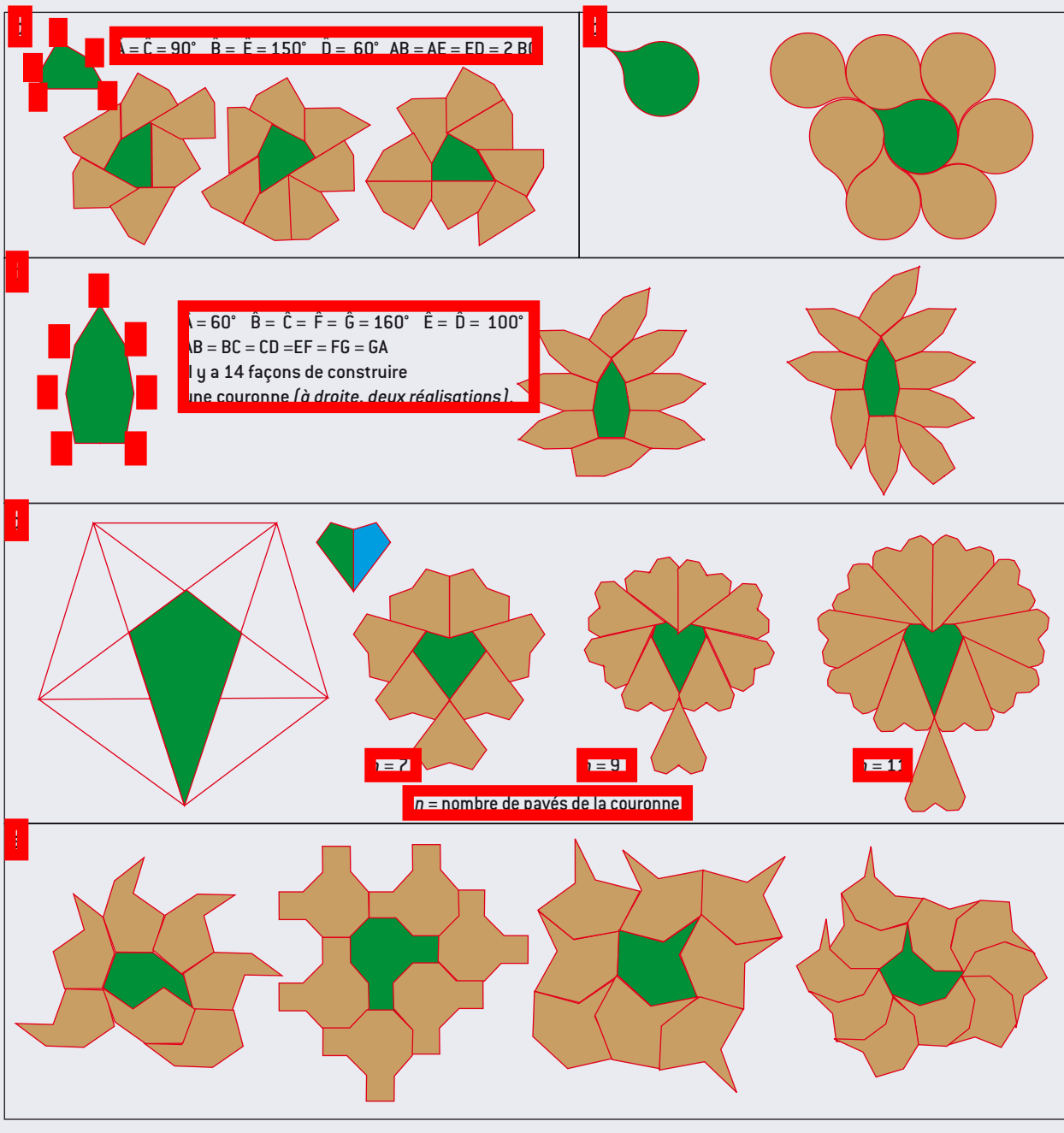


Une couronne, mais pas deux

Voici des exemples de pavés (en vert) ayant un nombre de Heesch égal à 1, c'est-à-dire des pavés que l'on peut entourer d'une couronne composée de copies du pavé et d'épaisseur non nulle, mais que l'on ne peut pas entourer d'une seconde couronne.

a) Le pavé découvert en 1968 par Heinrich Heesch et trois autres mathématiciens de la manière suivante :

b) La goutte d'eau de l'Allemand Walther Lietzmann (1928).
 c) Le bel heptagone de Yoshio Agaoka (2005).
 d) La méthode générale de Peter Raedschelders (1998) pour construire une famille infinie de pavés à nombre de Heesch égal à 1.
 e) Divers pavés avant un nombre de Heesch égal à 1 construits par Mark Thompson à partir de polygones réguliers.



nombre de Heesch fini. Une recherche systématique montre qu'il existe 14 façons différentes de faire une couronne autour de HA [voir la figure c page ci-contre pour deux exemples; trouver les 12 autres est un amusant casse-tête]. Ces diverses couronnes montrent que le nombre de Heesch de HA est au moins 1. Un peu de patience permet de s'assurer qu'aucune de ces 14 couronnes ne s'entoure d'une autre couronne; par conséquent, le nombre de Heesch de HA est exactement 1.

Peter Raedschelders, en Belgique, a découvert une famille infinie de pavés dont le nombre de Heesch est 1. On part d'une étoile régulière à k branches, avec k impair. Cela détermine une forme qui, accolée à elle-même, constitue le pavé cherché (figure d). L'intérêt de cette construction est que le nombre de pavés nécessaire pour construire la couronne est $k + 2$. Il s'ensuit que pour tout k , on connaît un pavé dont des copies s'assemblent pour couvrir une surface, presque ronde et sans trou, d'aire $(k + 3)$ fois supérieure à l'aire du pavé utilisé, mais qui ne peut pas paver le plan infini. La possibilité de paver un disque d'aire très grande par rapport à l'aire du pavé initial ne garantit donc jamais qu'il soit possible de paver le plan.

Des pavés au nombre de Heesch égal à 2 ou 3

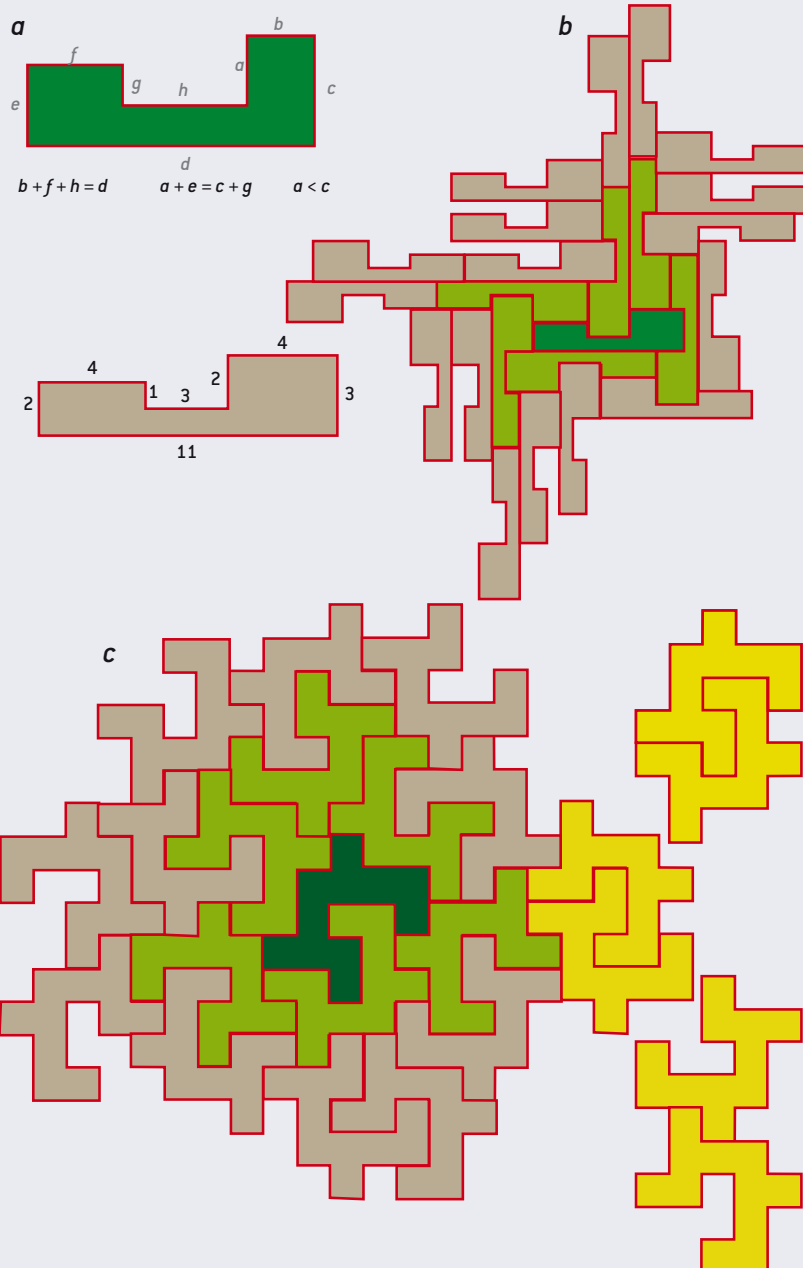
Il a fallu attendre 1991 pour que les premiers pavés à nombre de Heesch supérieur à 1 soient identifiés. Anne Fontaine, de l'Université de l'État de New York à Albany, proposa une famille entière de tels pavés. Une sorte de U s'entoure de deux couronnes, bien qu'il soit impossible d'en faire une troisième (voir l'encadré ci-contre, a et b).

En 2003, Glenn Rhoads, pour son travail de doctorat mené à l'Université du New Jersey, a étudié les pavés obtenus en accolant des carrés par leurs côtés, qu'on appelle polyomino. Ils ont été testés un à un jusqu'à en trouver d'intéressants. Le programme écrit par Glenn Rhoads a ainsi pu déterminer le plus petit polyomino dont le nombre de Heesch est 2 (ci-contre, c). Ce polyomino optimal est composé de

Deux couronnes, mais pas trois

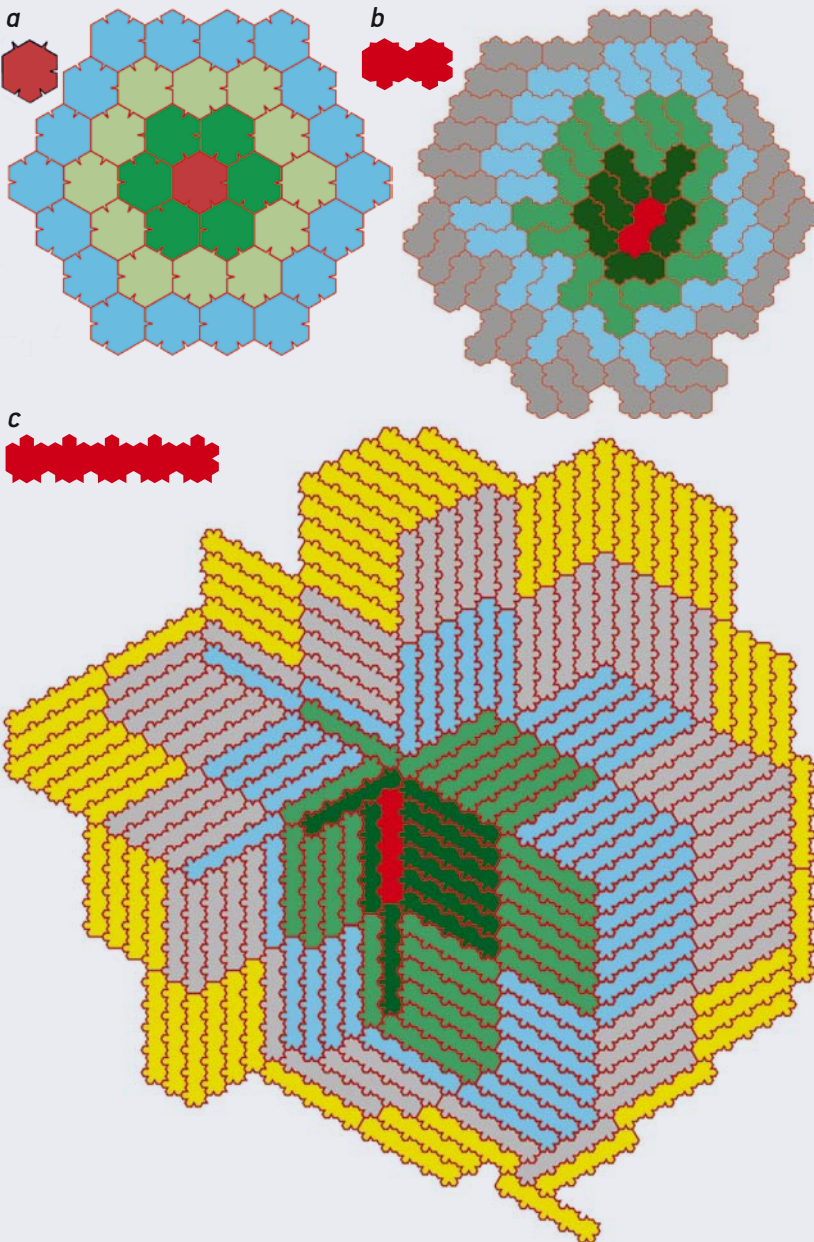
Les premiers pavés ayant 2 pour nombre de Heesch sont dus à Anne Fontaine. La forme générale, représentée en a, engendre une famille infinie de pavés. Un exemple de pavage partiel réalisant deux couronnes (mais pas trois) est dessiné en b.

Le dessin c montre le plus petit polyomino ayant un nombre de Heesch égal à 2 et les trois façons de disposer les deux couronnes: elles ne diffèrent que par la position de deux pavés (en jaune). Ce pavé a été trouvé à l'aide d'un programme écrit par Glenn Rhoads.



Le record actuel : cinq couronnes

L'Américain Robert Ammann a découvert en 1991 le premier pavé ayant un nombre de Heesch égal à 3 (a). Casey Mann, dans le cadre de sa thèse de doctorat soutenue en 2001 à l'Université de l'Arkansas, a fait mieux en construisant un pavé (b) à quatre couronnes (nombre de Heesch égal à 4). Enfin, le record mondial est jusqu'ici détenu par un pavé également découvert par Casey Mann (c). Son nombre de Heesch est égal à 5. Ce pavé est extensible (on peut l'allonger autant que l'on souhaite) et a toujours un nombre de Heesch égal à 5, pourvu qu'il soit composé d'au moins quatre hexagones de base.



11 carrés et il n'y a que trois façons de faire les deux couronnes. Elles ne diffèrent que par la position de deux pavés.

L'année où Anne Fontaine trouvait sa famille infinie de pavés ayant un nombre de Heesch égal à 2, l'Américain Robert Ammann, un amateur de divertissements mathématiques auteur de plusieurs trouvailles notables concernant les pavages du plan, découvrit un pavé dont le nombre de Heesch est égal à 3. Il s'agit d'un hexagone creusé sur deux côtés et muni d'une petite bosse sur trois autres côtés. Les creux, par exemple triangulaires, s'ajustent parfaitement aux bosses (voir l'encadré ci-contre, a). C'est en généralisant ce type de constructions qu'on a su dépasser le record de 3.

Lors de sa thèse soutenue à l'Université de l'Arkansas en 2001, Casey Mann, aujourd'hui en poste à l'Université de Washington, a entrepris l'étude systématique des trous et des bosses dans des formes avant le plan à la recherche de pavés dont le nombre de Heesch dépasse 3. Il s'est intéressé à trois types de formes : celles composées de carrés accolés par leurs côtés (les polyominos), celles composées d'hexagones accolés et celles composées de triangles équilatéraux accolés. En ajoutant des bosses et des creux complémentaires entre eux sur certains côtés de ces formes, on obtient des pavés, que Casey Mann dénomme poly-formes, dont le nombre de Heesch dépasse souvent 2.

Indécidabilité

Le résultat qui justifie la méthode et fait croire en son potentiel est le suivant : si P est une poly-forme dont n côtés sont munis d'une bosse et m côtés comportent un creux complémentaire de la bosse, et si m et n sont différents, alors le nombre de Heesch de P est fini (P ne pave pas le plan).

Ce résultat fournit un procédé d'énumération de pavés candidats qui ne pavent pas le plan et qui sont donc susceptibles de battre le record de Ammann. Notons d'ailleurs que le pavé de Ammann est une poly-forme : un hexagone où $m = 3$ et $n = 2$.

Le cas particulier obtenu en accolant k hexagones en liane et en les munissant

de $2k$ bosses et de $[2k+1]$ creux (une telle forme se dénomme k -hexapilier) a permis de battre le record de Robert Ammann : Casey Mann a prouvé que le nombre de Heesch des 2 et 3-hexapiliers est 4 et que le nombre de Heesch des k -hexapiliers où $k > 3$ est égal à 5 (voir l'encadré page ci-contre, c).

Casey Mann poursuit son étude systématique en cherchant à dénombrer les poly-formes en fonction de leur nombre de Heesch. Le projet est difficile car, même pour un petit nombre de côtés, les combinaisons possibles pour placer les creux et les bosses sont extrêmement nombreuses. Des milliers d'heures de calculs ont déjà été utilisées pour les décomptes.

Pour tout nombre de Heesch, des pavés ?

Pour l'instant, le record de 5 n'a pas été battu, mais selon Casey Mann, cela sera probablement le cas. Il pense en effet que, pour tout n , on trouvera des pavés ayant un nombre de Heesch supérieur à n . Cette conjecture affirmant l'existence de pavés dotés d'un nombre de Heesch aussi grand qu'on le veut est parmi les plus difficiles de la géométrie des pavages. Elle est liée à un autre problème important de la théorie des pavages, lui aussi non résolu.

Ce problème consiste à se demander si un pavé donné (qu'on prendra polygonal pour simplifier) pave le plan, et à rechercher un algorithme qui, à chaque fois qu'on lui soumettrait un tel pavé, calculerait (sans se tromper, bien sûr) la réponse, oui ou non. Dans le cas de plusieurs pavés (on se donne une famille finie de pavés polygonaux et on cherche à déterminer s'ils pavent le plan) la réponse est connue : il n'existe aucun algorithme réalisant ce travail. Cette « indécidabilité du problème du pavage » pour plusieurs pavés a été démontrée en 1966 par l'Américain Robert Berger.

Pour un seul pavé, la réponse est inconnue : on ignore s'il existe un algorithme infallible indiquant si un pavé polygonal pave ou non le plan.

Cependant, on montre que si le problème du pavage pour un pavé polygonal est indécidable, alors il n'existera pas de borne finie

pour le nombre de Heesch. Résoudre la conjecture concernant la décidabilité algorithmique du pavage par un polygone résoudrait donc la conjecture concernant le nombre de Heesch.

De nombreuses variantes du problème de Heesch ont été étudiées et parfois entièrement résolues.

Sur la sphère, peu de résultats sont connus. Le plus avancé est donné par un pavé, un triangle équilatéral d'angle 75° , dont le nombre de Heesch est 3. Dans les espaces euclidiens de dimension 3 ou plus, on sait limiter le nombre de Heesch (on place des bosses et des creux), mais pour l'instant, on n'a pas trouvé de formes ayant un nombre de Heesch supérieur à 5.

Si, au lieu de se placer sur le plan euclidien, on se place sur le plan hyperbolique, Alexey Tarasov de l'Académie des sciences de Russie a prouvé en 2010 que le nombre de Heesch d'un pavé peut être fini et aussi grand qu'on le veut. Il est assez étrange que le problème de Heesch soit plus facile sur le plan hyperbolique que sur le plan euclidien !

Pourquoi certains problèmes à l'énoncé simple, que tout le monde comprend, sont-ils aussi ardues ? Pourquoi nos puissantes machines explorant des millions de combinaisons par seconde échouent-elles à nous éclairer plus rapidement ? C'est l'un des mystères les plus profonds des mathématiques ; mais c'est aussi ce qui fait leur intérêt et leur charme : à chaque pas, même quand on se croit en terrain conquis, un obstacle inopiné surgit devant nous, exigeant des jours, des mois, des années ou des siècles de travail.

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

C. Mann et B. Thomas, Heesch number of edge-marked polyform, à paraître, 2015.

A. Akhmedov, Cayley graphs with an infinite Heesch number, prépublication arXiv:1412.0358, 2014.

A. Tarasov, On the Heesch number for the hyperbolic plane, *Mathematical Notes*, vol. 88(1-2), pp. 97-102, 2010.

C. Mann, Heesch's tiling problem, *American Mathematical Monthly*, vol. 111(6), pp. 509-517, 2004.

Références supplémentaires sur le site www.pourlascience.fr



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

DES NOUVELLES DES GRAPHS-ALLUMETTES

L'article sur les graphes-allumettes (*Pour la Science*, novembre 2014) a inspiré un lecteur qui a étendu le catalogue connu de ces graphes particuliers et délicats à classer. Le résultat du colossal travail d'Alexis Vaisse se trouve sur :

<http://alexis.vaisse.monsite-orange.fr/page-54b81c6bc01a2.html>

Dans les dénombrements qu'il a réalisés, Alexis Vaisse trouve 2008 graphes-allumettes à 10 arcs, qui s'organisent en 33 catégories. Pour ceux qui souhaiteraient vérifier le travail, le prolonger ou l'utiliser, diverses données et programmes concernant ces graphes sont disponibles sur la page web indiquée. Alexis Vaisse a entrepris de poursuivre le catalogue en traitant les graphes-allumettes à 11, 12 ou 13 arcs.

SCIENCE & FICTION

Quand les morts sortent de terre

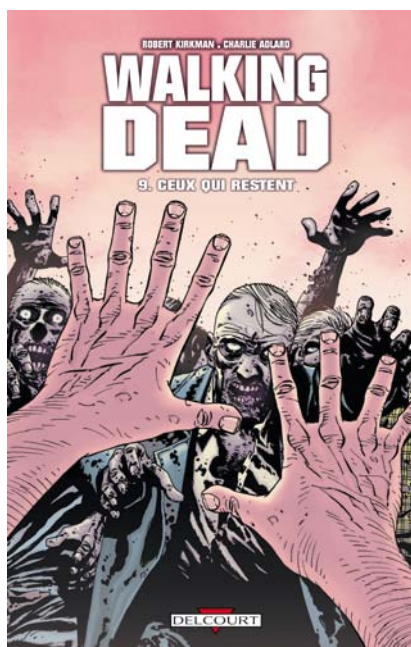
Les zombies, morts qui reviennent à la vie, c'est du cinéma ! Mais les fossiles, à partir desquels on reconstitue les espèces disparues et leur environnement, ne sont-ils pas les zombies de la paléontologie ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

En 1968, le cinéaste George Romero réalise *La Nuit des morts-vivants*, film d'horreur à petit budget en noir et blanc : des cadavres sortent de terre dans un cimetière de Pennsylvanie et sèment la terreur parmi les humains qu'ils tentent de dévorer ! L'engouement du public et le succès du film sont tels que le réalisateur, créant un genre à part entière, entreprend alors cinq suites dont *Zombie* (1978), critique de la société de consommation où les morts-vivants envahissent, cette fois, un centre commercial. Aujourd'hui, les zombies sont partout : grand écran, jeux vidéo, bandes dessinées, séries télé et romans.

Le terme proviendrait du créole haïtien *zombi* qui désigne, dans la culture vaudou, une personne en état de transe, souvent violente et capable d'entrer en communication avec les morts. Lent ou rapide, passif ou affamé, le zombie, quel que soit son état de décomposition, demeure avant tout un humain, victime d'une maladie dégénérative souvent transmissible, qui finit par ressusciter.

Ainsi, le phénomène de « zombification » touche avant tout *Homo sapiens*. Certains cinéastes inventifs ont cependant appliqué le genre zombie aux animaux, créant ainsi une véritable « nécrodiversité ». Par exemple, dans *Re-Animator* (Stuart Gordon, 1985) librement inspiré d'une nouvelle de Howard Phillips Lovecraft –, des médecins déjantés inventent un sérum capable de ressusciter



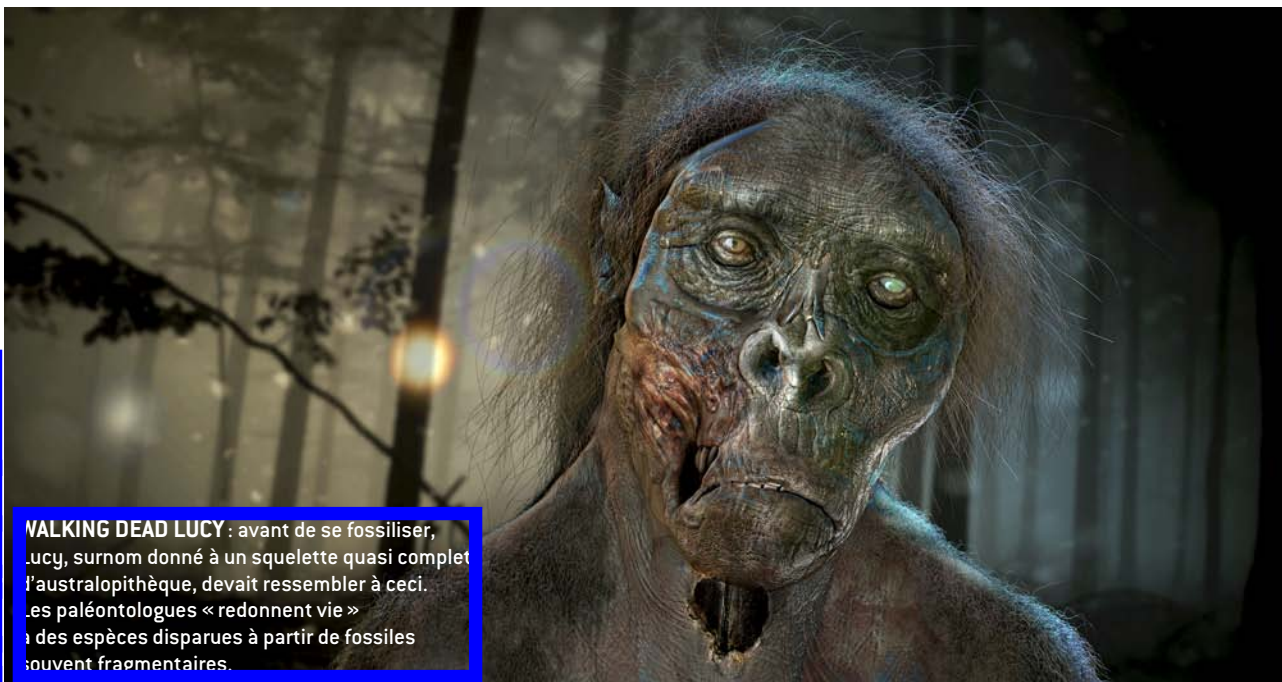
DANS *THE WALKING DEAD*, une bande dessinée adaptée en série télévisée, les héros tentent de survivre dans un monde envahi par les zombies

les morts. Ils le testent d'abord sur un chat écrasé avant de s'occuper des cadavres de la morgue. Dans *Braindead* (Peter Jackson, 1992), un zombie mi-singe mi-rat mord la mère du jeune héros, qui se transforme alors en monstre et contamine d'autres personnes. Citons également les dobermans zombies dans le jeu vidéo et le film *Resident Evil*, les moutons zombies dans le loufoque *Black Sheep* (Jonathan King, 2006) ou, pire encore, les castors zombies qui s'attaquent à un groupe d'étudiantes dans *Zombeavers* (Jordan Rubin, 2014)...

Cette nécrodiversité, aussi fantasque soit-elle, n'est pas sans rappeler ce que les paléontologues nomment très sérieusement une thanatocénose (du grec *thanatos*, la mort, et *cénose*, la population), notion majeure dans la compréhension de l'évolution de la vie sur Terre.

Pour reconstituer les « mondes disparus », les paléontologues ne disposent que de fossiles, c'est-à-dire de restes d'organismes qui se sont pétrifiés avec le temps. Les spécialistes parlent de perminéralisation : dans le sol, de l'eau riche en minéraux a comblé les espaces vides dans l'organisme mort, les minéraux ont précipité et ont ainsi préservé de nombreux détails morphologiques.

Avant leur fossilisation, les organismes sont, tout comme les zombies des films d'horreur, dans un état plus ou moins avancé de décomposition. Lorsqu'on les découvre enfouis dans les strates géologiques, ces



WALKING DEAD LUCY : avant de se fossiliser, Lucy, surnom donné à un squelette quasi complet d'australopithèque, devait ressembler à ceci. Les paléontologues « redonnent vie » à des espèces disparues à partir de fossiles souvent fragmentaires.

estes constituent alors ce que l'on nomme un assemblage fossile, très utile pour comprendre l'environnement de l'époque et les conditions de fossilisation.

Un assemblage fossile englobe souvent les restes de formes, de tailles et de natures variées, conservés dans la même couche sédimentaire : grains de pollen, débris végétaux, fragments de coquilles, dents solées, esquilles osseuses ou squelettes complets sont autant de vestiges d'espèces ayant alors vécu à la même époque. Même si beaucoup d'organismes du site étudié n'ont pas fossilisé, l'assemblage fossile donne aux paléontologues une idée de la thanatocénose, c'est-à-dire de la population d'organismes morts : une étape décisive pour reconstruire ensuite la paléobiocénose, autrement dit, la population totale des organismes vivants à l'époque.

Afin de reconstruire la totalité de la biocénose à partir de la thanatocénose, les paléontologues font appel à une discipline à part entière, la taphonomie (du grec *taphos*, l'enfouissement). Cette science vise à reconstruire l'histoire de chaque spécimen, de sa mort jusqu'à la découverte de son fossile : a-t-il été transporté, par un cours d'eau par exemple, avant de se fossiliser ? S'est-il déposé à l'endroit ou à l'envers dans le sédiment ? A-t-il été enseveli rapidement ou, au contraire, a-t-il subi l'action de charognards ou d'autres nécrophages ? Toutes les parties de son squelette sont-elles fossilisées ? Enfin, quelles

transformations chimiques se sont opérées lors de sa fossilisation ? Autant de questions qu'un « expert » de la série télévisée éponyme se pose afin de reconstituer une scène de crime.

Le paléontologue, expert des morts fossilisées

Pour étudier un fossile, le paléontologue dispose de divers outils et méthodes. Une analyse est souvent effectuée au microscope électronique à balayage. Elle met en évidence de nombreuses traces invisibles à l'œil nu, telles que des micro-usures (sur les dents, elles indiquent le type de nourriture ingéré), des marques de corrosion (si l'organisme en question est passé dans un tube digestif avant d'être fossilisé), de prédation ou encore de perforation (certains vers nécrophages, que l'on voit parfois dans les films, percent les os des cadavres).

La plupart des raisonnements du paléontologue reposent sur le principe d'actualisme – aussi nommé uniformitarisme – qui stipule que les phénomènes se déroulant de nos jours n'ont aucune raison de ne pas avoir existé dans le lointain passé de la Terre. Ainsi, il y a toujours eu des herbivores mangés par des prédateurs, des reliefs érodés par les pluies, ou encore des cours d'eau charriant des cadavres. L'observation de phénomènes actuels peut donc renseigner sur la formation de fossiles, même si ce processus est parfois très long. Tel

est l'objectif de la taphonomie expérimentale qui, en plaçant par exemple des carcasses de crevettes dans une solution saturée en phosphore, tente de mieux comprendre la formation de crustacés fossiles dans des sédiments riches en phosphates. Enfin, la géochimie se révèle tout aussi utile en étudiant les réactions chimiques qui ont lieu lors de la transformation des sédiments en roches ou de restes organiques en fossiles.

Avec l'analyse de la thanatocénose d'un gisement de fossiles, la taphonomie complète la reconstitution d'un environnement aujourd'hui disparu. Parfois, cette reconstitution demande aussi un peu d'imagination : ce n'est peut-être pas pour rien que la taphonomie a été créée par le paléontologue explorateur russe Ivan Efremov (1907-1972), spécialiste des stégocéphales (ou amphibiens anciens) et auteur de science-fiction. L'utopie cosmique *La nébuleuse d'Andromède* (1957), son œuvre la plus connue, lui a même valu le titre de « père de la science-fiction soviétique ».

Il est clair que l'imagination sert la fiction, mais elle sert aussi la science, surtout lorsque celle-ci est historique. Le rêve des paléontologues, ces nécromanciens du passé, n'est-il pas finalement de ramener les morts à la vie ? ■

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

ART & SCIENCE

Le laboureur des champs... magnétiques

L'artiste grec Takis a fait des champs magnétiques sa matière de prédilection pour concevoir ses œuvres. Grâce à ces forces, il fut même le premier à envoyer un homme dans l'espace !

Loïc MANGIN

Qui a été le premier homme dans l'espace ? Vous pensez sans doute à Youri Gagarine. De fait, le Russe a bien effectué un vol spatial, le 12 avril 1961. Mais son exploit a eu un précédent, six mois auparavant... dans la galerie d'iris Clert, rue des Beaux-Arts, à Paris.

En novembre 1960, le poète sud-africain Sinclair Beiles y était le cobaye d'une expérience ambitieuse : maintenir en lévitation un homme grâce à des champs magnétiques. Le résultat ne fut guère probant, et l'intrépide se retrouva vite dans le filet de sécurité. Il n'empêche, Sinclair Beiles a été le premier à s'affranchir de la gravité terrestre [c, la photographie au fond de la salle]. C'est au moins l'avis du critique d'art Jean Clay qui traita Gagarine d'« imitateur Soviétique » !

L'instigateur de l'événement était l'artiste grec Vassilakis Takis, né en 1925. Aux yeux de Marcel Duchamp, il devenait un « gai laboureur des champs magnétiques et un indicateur des chemins de fer doux ». De fait, en parcourant la rétrospective qui consacre le Palais de Tokyo, à Paris, on se rend compte que l'une des matières premières de Takis est le magnétisme. Depuis la fin des années 1950, la plupart des œuvres en font, selon ses termes, une « quatrième dimension ».

Ainsi, dans ses *Murs magnétiques*, des objets métalliques sont en sustentation, attirés d'un côté par des aimants dissimulés derrière une toile et retenus de l'autre par des fils invisibles [c, sur le mur de droite]. Ces objets semblent flotter dans l'air. Takis reprit le principe avec des plaques métalliques pour une installation commandée par le Centre Pompidou dans les années 1980. Dans la même veine, il a également élaboré une version érotique du martyre de saint Sébastien, les flèches étant suspendues par un procédé similaire.

Le magnétisme est aussi le moteur de sculptures musicales conçues à partir du milieu des années 1960. Placé derrière un panneau de bois, un électro-aimant attire et repousse régulièrement une aiguille métallique qui frappe alors une corde de piano. Une série de ces sculptures, distinctes par la tension de la corde et l'endroit du contact, crée une musique aléatoire et étrange [b].

D'autres œuvres sont plus ludiques et nécessitent la participation du public. Par exemple, avec *Antigravités*, les visiteurs sont invités à jeter des poignées de gros clous sur une plaque aimantée incurvée [a]. Il en résulte des fleurs de métal hérissées de pointes. Avec les *Festins magnétiques*, on manipule des petits tas de limaille de fer sur une plaque aimantée afin de modeler des sculptures éphémères.

Ce ne sont que quelques exemples des nombreuses créations de ce « savant intuitif » qui a séjourné à l'Institut de technologie du Massachusetts, à Boston, pour s'imprégner de science. Il a d'ailleurs plusieurs brevets à son actif. On pourrait aussi citer un hommage au pendule de Foucault ou bien un autre à Franz Kafka. Une exposition propre à vous faire perdre le Nord !

Takis, *Champs magnétiques*, au Palais de Tokyo, à Paris, jusqu'au 17 mai 2015. <http://bit.ly/PT-Takis>

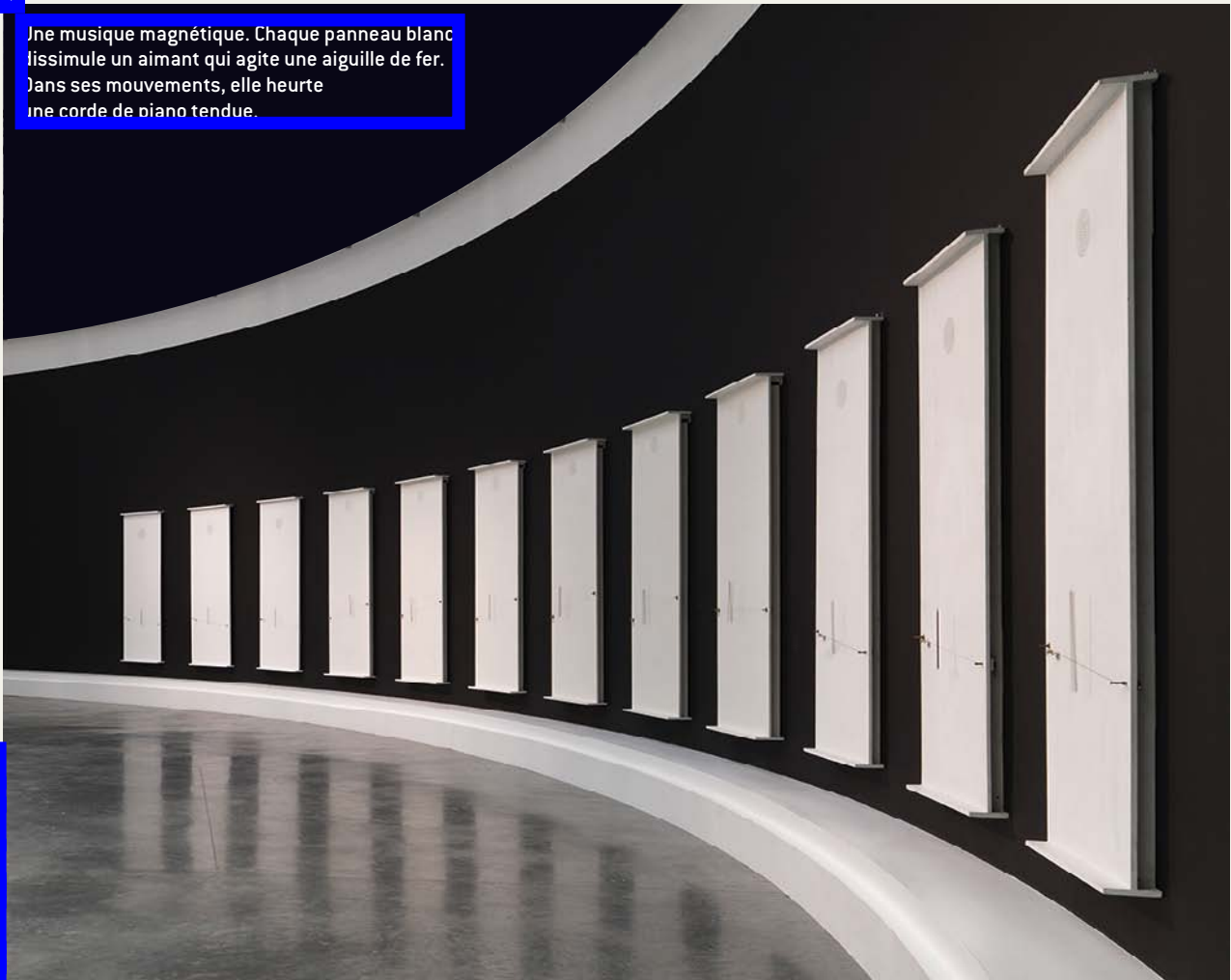
Faites eclorre des bouquets métalliques en jetant des poignées de clous sur une plaque aimantée.

a

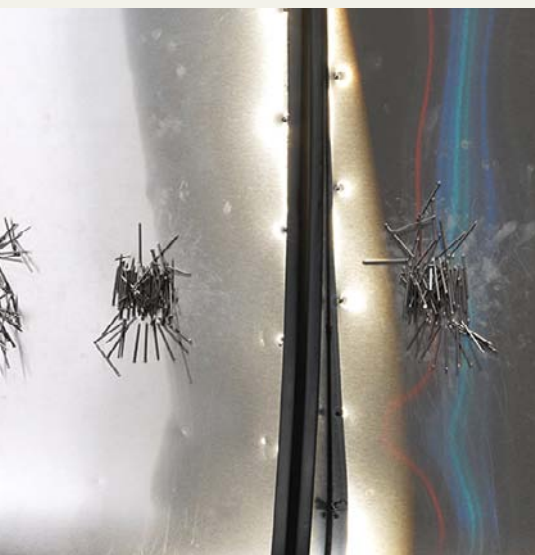


Rendez-vous

Une musique magnétique. Chaque panneau blanc lisse cache un aimant qui agite une aiguille de fer. Dans ses mouvements, elle heurte une corde de piano tendue.



Le premier homme dans l'espace apparaît sur la photo au fond de la salle. À droite, des cônes métalliques sont en sustentation, à quelques centimètres des toiles.



IDÉES DE PHYSIQUE

Ces boîtes qui crient « Au feu ! »

Les détecteurs de fumée sont devenus obligatoires dans les logements français. Leur principe de fonctionnement : ils déclenchent l'alarme dès qu'ils captent de la lumière diffusée par les particules de fumée.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Afin d'alerter les dormeurs en cas d'incendie nocturne, tous les logements en France doivent, depuis mars 2015, être équipés d'un « détecteur avertisseur autonome de fumée » (DAAF). Ces dispositifs émettent une alarme sonore lorsqu'ils détectent les signes d'un départ de feu (voir la figure ci-dessous). Dans le monde, on trouve généralement deux types de détecteurs de fumée, peu onéreux et robustes : les détecteurs optiques et les détecteurs ioniques. Voyons à quels principes ils font appel.

Le bon choix : la fumée

Comment détecter vite et avec fiabilité un incendie ? En décelant une modification rapide des grandeurs physiques liées au feu : hausse de température, rayonnement spécifique des flammes, présence de gaz de combustion ou de fumée.

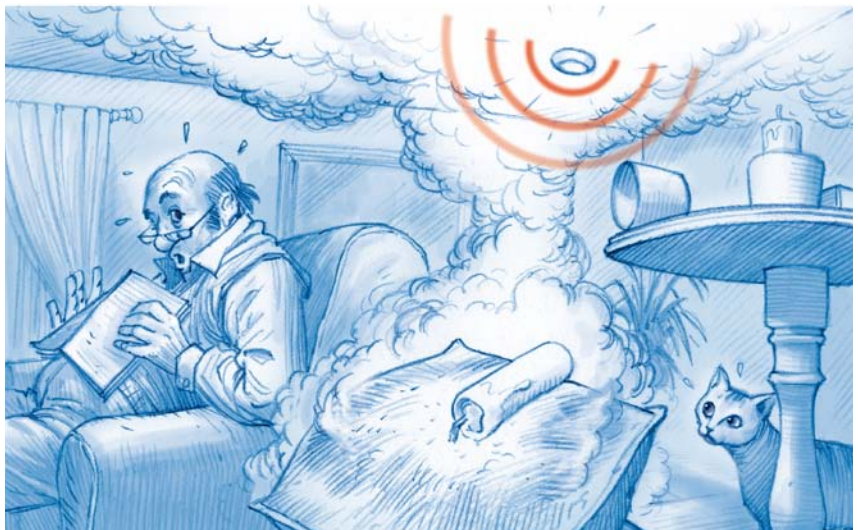
Que choisir ? Les détecteurs modernes de température qui mesurent les effets de la chaleur grâce à un réseau distribué de fibres optiques sont bien adaptés à de grandes structures telles que tunnels, stations de métro ou usines, mais pas aux habitations. La détection du rayonnement infrarouge ou ultraviolet des flammes, elle, nécessite une analyse à plusieurs longueurs d'onde, délicate à mettre en œuvre si l'on veut éviter des alarmes intempestives. Quant aux détecteurs de monoxyde de carbone, ils sont plus chers et usent plus vite les piles.

C'est donc finalement la fumée, due à une combustion incomplète des matériaux, qui est la plus facilement détectable. Elle constitue en outre l'une des signatures les plus précoces des feux couvants, dont la combustion peut être longue avant que n'apparaissent les premières flammes.

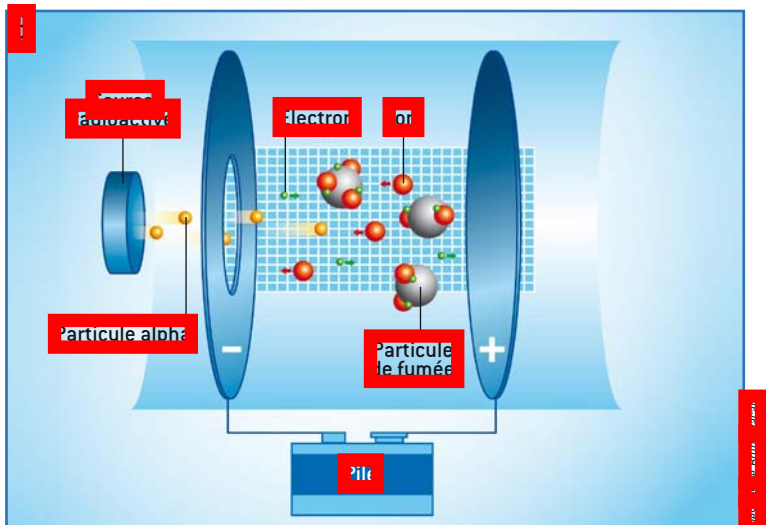
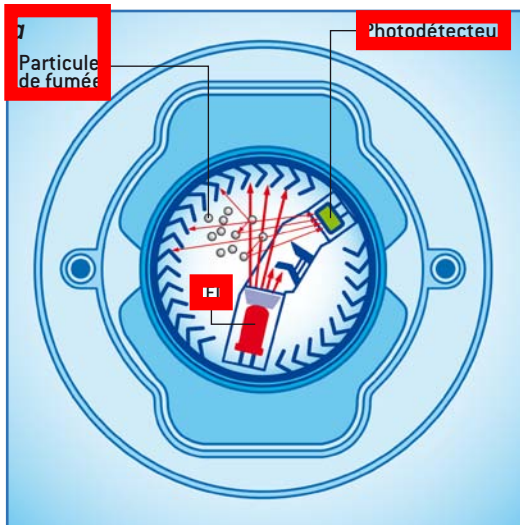
Les particules de fumée sont formées par l'agrégation aléatoire de sphérules dont le diamètre est de quelques centièmes de micromètre. Les agrégats sont de tailles variables, allant jusqu'à une dizaine de micromètres, la taille moyenne étant de l'ordre de un micromètre. La fumée est, par ailleurs, une substance opaque. Autrement

dit, elle absorbe la lumière qu'elle reçoit. On peut estimer cette absorption grâce à la taille des particules de fumée. Si l'on recouvre une surface de un mètre carré par des particules de un micromètre de diamètre, on obtient une surface parfaitement opaque avec un millionième de mètre cube de suie, soit une masse de l'ordre du gramme.

Il s'ensuit que si la concentration des particules de fumée est de l'ordre du gramme par mètre cube, un rayon lumineux a toutes les chances d'être intercepté au bout de un mètre. Pour la taille d'un détecteur, qui est plutôt de l'ordre du centimètre, l'absorption de lumière sera bien plus faible, de l'ordre du



LES DETECTEURS DE FUMÉE émettent une alarme sonore. Ceux autorisés en France sont les détecteurs optiques, mais on trouve dans d'autres pays des détecteurs ioniques.



DANS UN DETECTEUR OPTIQUE (a), une LED émet de la lumière, que les particules de fumée diffusent. Le photodétecteur capte une partie de la lumière diffusée, tandis que les rayons lumineux provenant directement de la LED lui sont masqués. Les chevrons empêchent les

réflexions parasites. Dans un détecteur ionique (b), des particules alpha ionisent l'air entre les électrodes. Un courant électrique s'établit. La présence de particules de fumée, auxquelles se collent des ions et des électrons, a pour effet de diminuer l'intensité du courant.

pourcent, voire moins. La réduction du flux lumineux sera difficile à mesurer de façon fiable si l'intensité de la source de lumière n'est pas parfaitement stabilisée.

Mais tout n'est pas perdu : les particules de fumée non seulement absorbent de la lumière, elles en renvoient aussi dans toutes les directions. C'est le phénomène de diffusion, que l'on retrouve dans le brouillard, la neige... milieux qui demeurent d'un blanc laiteux car ils dévient la lumière, sans l'absorber.

L'optique, préférée à la radioactivité

Pour les toutes petites particules de quelques centièmes de micromètre, on est dans le cas d'une diffusion dite de Rayleigh avec, comme pour les molécules de l'air, une diffusion privilégiée des longueurs d'onde lumineuses les plus courtes. La délicate fumée qui monte d'une cigarette apparaît ainsi bleutée, pour les mêmes raisons que le ciel est bleu.

Pour les feux plus intenses, la plupart des particules de fumée sont plus grosses, de taille comparable aux longueurs d'onde de la lumière (quelques dixièmes de micromètre). Dans ce cas, on a des effets d'interférence entre les ondelettes diffusées par les différentes parties des particules. On est alors

dans le régime de la diffusion dite de Mie. Les calculs, complexes, montrent que la diffusion devient à peu près indépendante de la longueur d'onde lumineuse. La fumée éclairée est ainsi blanche, comme le sont les nuages dans le ciel, lorsqu'elle est peu dense et absorbe peu ; elle devient de plus en plus grise, voire noire à mesure qu'elle s'épaissit.

C'est sur cette diffusion que sont fondés les détecteurs optiques de fumée. Une diode électroluminescente (LED) éclaire un volume d'air tandis qu'un photodétecteur capte la lumière diffusée par ce même volume (voir la figure ci-dessus, a). Si l'on masque les rayons lumineux qui iraient directement de la source lumineuse au photodétecteur, et si les parois de la boîte absorbent toute lumière incidente, le photodétecteur ne capte rien ou presque en situation normale.

En revanche, dès que des particules de fumée pénètrent dans le volume du dispositif, elles diffusent la lumière émise par la diode. Ce flux diffusé, quoique faible, est bien plus facile à détecter qu'une variation de 1 % d'un éclairage déjà présent. En pratique, les détecteurs optiques sont aujourd'hui sensibles à une « fumée grise » dont l'absorption est de l'ordre de 0,06 % par centimètre.

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTIVY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphus.fr>



Retrouvez la rubrique données de physique sur www.pourlascience.fr

BIBLIOGRAPHIE

J. Liu et A. K. Kim, Review of recent developments in fire detection technologies, *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 13(2), pp. 129-151, mai 2003.

S. W. Mulholland, Smoke production and properties, dans *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association [2^e édition], pp. 217-227, 1995.

Cette solution n'est pas la seule. Une autre catégorie de détecteurs est fondée sur un tout autre principe : l'interaction des particules de fumée avec des charges électriques (ions, électrons) créées dans l'air (voir la figure page 89, b). Ces détecteurs comportent une petite source radioactive, en général de l'américium 241. Les rayons alpha (des noyaux d'hélium) émis par cette source heurtent les molécules de l'air qui se trouvent dans la chambre du détecteur et les ionisent. Soumis au champ électrique créé par deux électrodes placées de part et d'autre de la chambre, les ions et les électrons ainsi produits se déplacent jusqu'à être captés par ces électrodes, d'où un faible courant électrique.

Lorsque des particules de fumée pénètrent dans la chambre, elles captent à la fois des ions et des électrons, lesquels se

neutralisent. Cela diminue légèrement le courant d'ionisation, comparé à un courant de référence créé au sein d'une chambre parfaitement scellée. Cette comparaison permet de compenser les modifications de courant dues aux variations de température, de pression de l'air ou de vieillissement de la source sur plusieurs années. La sensibilité de ces dispositifs est excellente !

Ce type de détecteurs contient hélas une source radioactive. La quantité d'américium est assez faible pour que la radioactivité engendrée, 37 000 becquerels, soit très faible (inférieure à la radioactivité naturelle de six adultes !). Il n'empêche : par précaution, en raison de la longue durée de vie de l'américium (demi-vie de 432 années) et des risques de dispersion dans l'environnement, la France a interdit ces détecteurs depuis fin 2011.

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

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

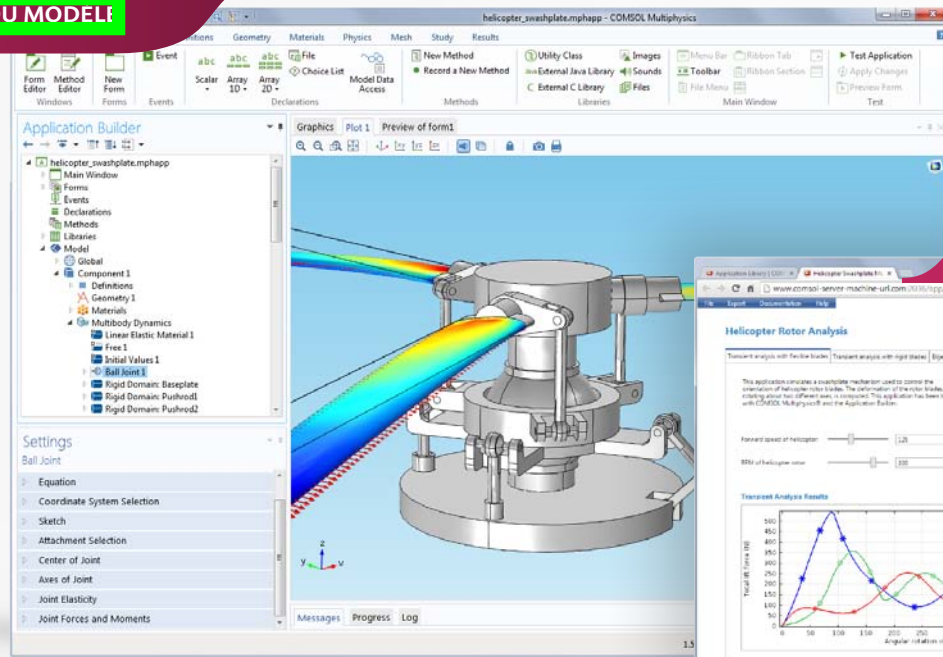
& Retrouvez aussi l'application « Cerveau & Peau »



Téléchargez gratuitement l'application sur App Store et Google Play. Un extrait du numéro en cours de parution vous est offert !

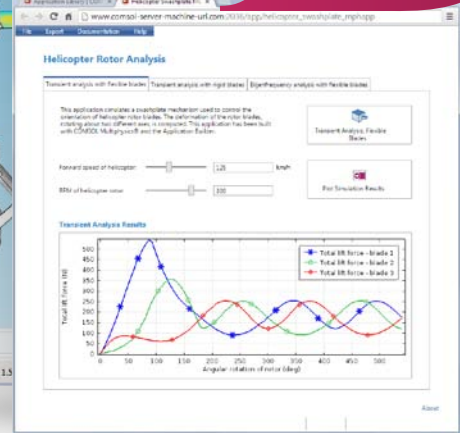


DU MODÈLE



COMSOL
MULTIPHYSICS®

À L'APPLICATION



COMSOL
SERVER

Testez et Optimisez vos designs avec
COMSOL Multiphysics®

NOUVEAUTÉS : APPLICATION BUILDER ET COMSOL SERVER™

L'Application Builder vous permet de créer facilement des interfaces métiers à partir de vos modèles multiphysiques. COMSOL Server™ vous permet de distribuer vos applications à vos collègues et à vos clients partout dans le monde.

visitez comsol.fr/release/5.0

Product Suite

COMSOL Multiphysics®
COMSOL Server™

ELECTRICAL

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

MECHANICAL

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

FLUID

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

CHEMICAL

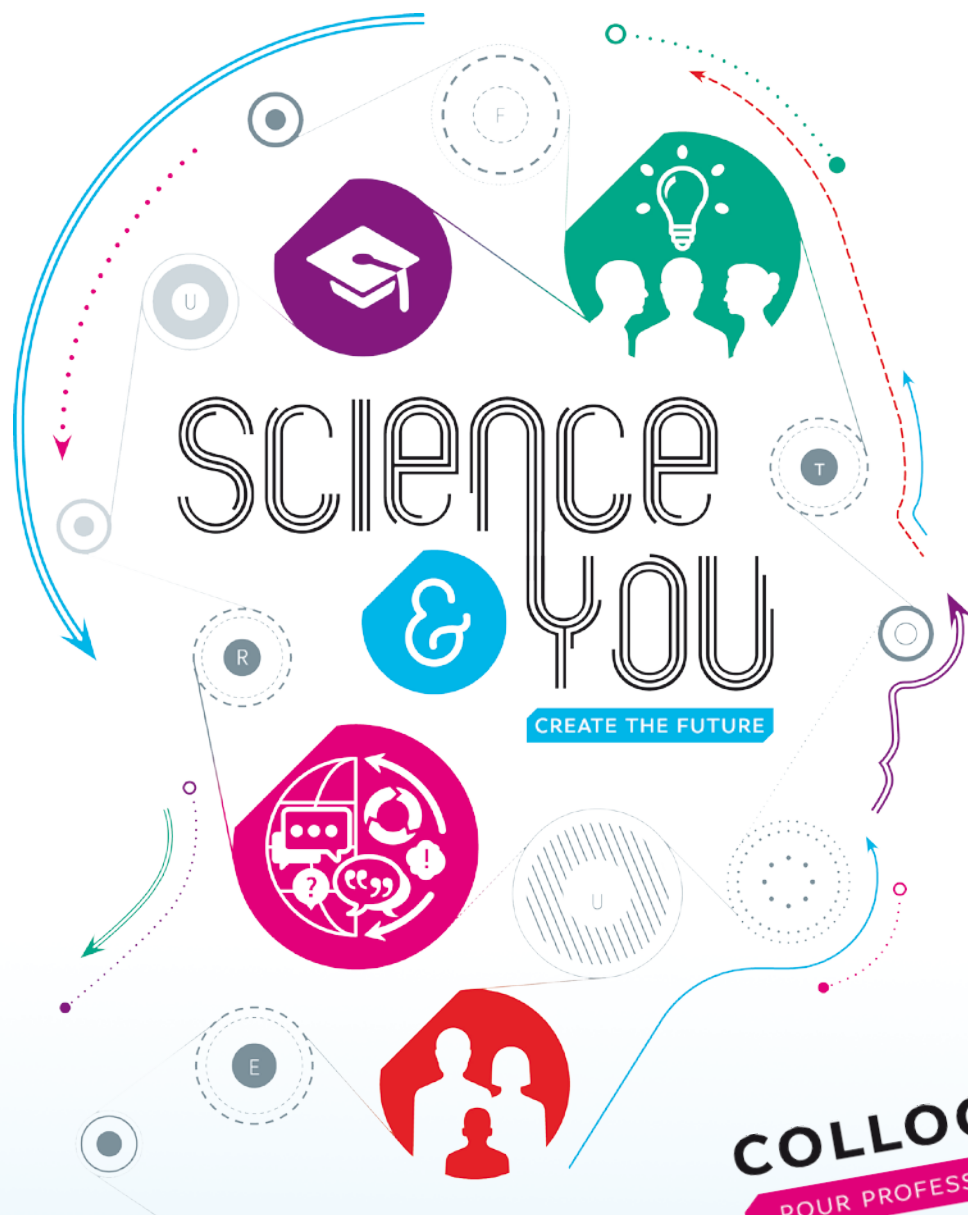
Chemical Reaction
Engineering Module
Batteries & Fuel Cells Module
Electrodeposition Module
Corrosion Module
Electrochemistry Module

MULTIPURPOSE

Optimization Module
Material Library
Particle Tracing Module

INTERFACING

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



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

QUESTION AUX EXPERTS

Pourquoi a-t-on des courbatures ?

Ces douleurs seraient dues à une inflammation, liée aux dommages musculaires que provoque un effort intense.

Stephen ROTH



Allongé dans votre lit, vous retardez le moment de vous lever : vos jambes sont lourdes et douloureuses. Le lendemain matin, vous vous êtes remis au footing et avez couru près d'une heure, sur un terrain pentu. Résultat : vous êtes perclus de courbatures. Ces dernières culminent généralement 24 à 72 heures après un effort extrême et se caractérisent par une douleur musculaire parfois intense, ainsi que par une perte de puissance et l'amplitude des mouvements. À quoi les courbatures sont-elles dues ?

Commençons par décrire le fonctionnement du corps lors d'un exercice physique. La respiration s'accélère et apporte davantage d'oxygène aux muscles. Une série de réactions biochimiques décomposent le glucose de l'organisme, ce qui produit de l'énergie. En temps normal, une partie de ces réactions sont aérobies, c'est-à-dire qu'elles consomment de l'oxygène. Cependant, ce dernier ne peut être fourni en quantité suffisante lors d'efforts intenses, par exemple quand on doit transporter une lourde armoire ou — fait plus rare aujourd'hui ! — battre un prédateur à la course.

Dans ce cas, pour fournir de l'énergie, les réactions anaérobies prennent le relais dans les muscles. Elles produisent de l'acide lactique, sous une forme nommée lactate. Les cellules musculaires peuvent maintenir cette voie énergétique anaérobie à une intensité élevée pendant une à trois

minutes, lors desquelles l'acide lactique s'accumule.

En conséquence, l'acidité augmente, ce qui perturbe les voies métaboliques de transformation du glucose en énergie. Les muscles peinent alors à poursuivre leurs contractions. Il s'agit là d'un mécanisme de défense naturel pour qu'ils ne dépassent pas leurs limites et ne subissent pas des dommages permanents durant un effort extrême. Ce mécanisme est renforcé par une sensation douloureuse, provoquée par l'accumulation d'acide lactique et d'autres métabolites, et qui pousse à arrêter l'exercice. Par la suite, de l'oxygène redevient disponible et l'acide lactique est reconverti en un produit utilisable par le métabolisme aérobie, qui redémarre.

L'acide lactique n'est pas responsable

L'acide lactique est-il responsable des courbatures, comme on le croit souvent ? Non : les chercheurs ont mesuré sa concentration juste après un effort et ont trouvé qu'il n'y a qu'une faible corrélation entre cette concentration et l'intensité des courbatures, estimée quelques jours plus tard.

D'où proviennent donc les courbatures ? La plupart des études suggèrent qu'elles sont dues à l'endommagement des cellules musculaires provoqué par un effort intense et à la libération de métabolites variés dans le tissu entourant ces cellules. Une réponse

inflammatoire se déclenche alors pour réparer les dégâts. Elle se traduit par un gonflement et des douleurs qui culminent un jour ou deux après l'effort et disparaissent plus ou moins vite selon l'importance des dommages.

Les courbatures sont particulièrement favorisées par les contractions dites excentriques, lors desquelles le muscle se contracte en même temps qu'il est étiré par une charge. Imaginez par exemple qu'on vous lance un objet de 500 kilogrammes et que vous essayez de l'attraper au vol : vos biceps ne vont pas pouvoir se raccourcir en se contractant, malgré l'effort fourni... Ces contractions excentriques sont celles qui endommagent le plus les cellules musculaires. Dès lors, un exercice physique déclenche des courbatures plus intenses lorsqu'il met en œuvre de telles contractions, et ce même si l'on ne ressent pas de douleur pendant l'effort. C'est le cas par exemple d'une course en descente.

On entend souvent que les anti-inflammatoires pourraient prévenir ou soigner les courbatures. C'est bien le cas, mais ils ne sont pas recommandés pour autant. En effet, ils ralentiraient aussi la réparation des dégâts musculaires, et donc la récupération dans les semaines suivant l'exercice. Le produit anticourbature idéal n'existe pas encore...

Stephen ROTH est professeur de physiologie de l'exercice à l'Université du Maryland, aux États-Unis.

SCIENCE & GASTRONOMIE

L'auto-organisation des mets

En jouant sur des phénomènes tels que la gélification, la sédimentation et la floculation, on peut transformer le lait en un gel fibreux.

Hervé THIS

La qualité des pâtisseries est le fruit du travail de « construction » des pâtisseries qui empilent des couches de différentes consistances, couleurs et goûts. Les cuisiniers ne sont pas en reste : le célèbre Marie-Antoine Carême étudiait l'architecture pour structurer ses mets.

Le cuisinier peut créer des structures en observant les phénomènes naturels. Par exemple, quand on cuit du riz à la casserole et que l'eau vient à manquer, apparaissent des « cheminées » réparties de façon approximativement hexagonale. Pourra-t-on maîtriser de tels phénomènes afin de donner de la structure à du blanc d'œuf cuit ou à un gel de gélatine dans un bûche ?

Des chimistes de l'Inra à Nantes avaient étudié comment l'ajout de gélatine fait grumeler du lait bouillant. Toutefois, cette décomposition est aléatoire. En 2001, des physico-chimistes ont observé que l'ajout de gomme xanthane produisait le même résultat qu'avec la gélatine ; mieux, Christian Sanchez et ses collègues de l'ENSAIA, à Nancy, avaient montré que des structures fibreuses apparaissent parfois quand un gel laitier se forme en présence de xanthane.

Tout récemment, Anne Rohart et Camille Michon, d'AgroParisTech, ont précisé les mécanismes du phénomène. Au départ, le lait est stable, car les micelles de caséines (des protéines) et de phosphate de calcium dont il est constitué sont couvertes de caséines kappa, qui sont électriquement chargées : la répulsion électrostatique des micelles assure la stabilité dans l'eau.

On obtient des gels laitiers (yaourts, par exemple) en acidifiant, par divers moyens : avec des bactéries lactiques, qui transforment le sucre du lait (le lactose) en acide lactique, ou en ajoutant un composé nommé glucono-delta-lactone, qui se dissocie dans l'eau et acidifie lentement le milieu. La lenteur de l'acidification importe : quand elle est trop rapide, comme quand on ajoute du jus de citron dans du lait chaud, la coagulation fait une myriade de petits grumeaux coagulés, au lieu de former un gel macroscopiquement lisse, comme celui du yaourt.

Le second partenaire des gels laitiers autostructurants est le xanthane. Là, un autre phénomène nommé déplétion-floculation modifie le milieu. La grande taille des molécules de xanthane ne leur permet pas de s'insérer entre des groupes de micelles de caséine. Il s'ensuit que, entre ces dernières, la concentration en xanthane est nulle, alors qu'elle est notable à l'extérieur des groupes. Par osmose, les molécules d'eau quittent les groupes pour diluer le xanthane extérieur, ce qui conduit au rapprochement des micelles. L'ajout de xanthane à du lait conduit ainsi à la formation de deux phases, l'une riche en protéines et l'autre riche en xanthane. Ces phases n'ayant pas la même densité, une sédimentation peut se produire. Si la gélification de la phase dispersée s'effectue pendant ce temps, des microgels allongés sont formés.

Trois phénomènes coexistent : la formation de structures, la sédimentation de zones denses et la gélification des zones « laitières ». Si les vitesses de chacun sont ajustées, des colonnes de gels laitiers sont piégées dans

une phase continue épaissie par le xanthane. Ce processus peut être généralisé de nombreuses façons. La sédimentation peut être remplacée par un crémage. La prise en gel pourrait être obtenue par coagulation des protéines à la chaleur ou par ajout d'ions calcium ou une solution d'alginate de sodium. Enfin, la formation de structures pourrait résulter d'évaporations guidées, notamment par la pose d'une grille percée de trous régulièrement espacés au-dessus du système liquide initial.

En attendant, nous utiliserons poudre de lait et gomme xanthane pour obtenir un système fibreux. Dispersons d'abord de la poudre de lait dans un liquide (de l'eau, du vin, du bouillon, du jus de fruit), à pH neutre. Laissons la poudre de lait s'hydrater, puis chauffons-la à 80 °C pendant une dizaine de minutes, afin de dénaturer les protéines. Réduisons la température à 60 °C, ajoutons environ 0,05 % de gomme xanthane, 1,5 % de glucono-delta-lactone à 43 °C et réduisons la température à la température ambiante. Moins compliqué qu'une recette de faisan à l'Albuféra, n'est-ce pas ?



Hervé THIS, physico-chimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation science & culture alimentaire [Académie des sciences].



Retrouvez la rubrique science & gastronomie sur www.pourlascience.fr



Illustration : J. N.

STRUCTURER ET ORGANISER VOS SOURCES: **ENDNOTE.**

L'OUTIL DE REFERENCEMENT N°1 POUR LES CHERCHEURS

Sur Mac® ou Windows® – sur votre bureau ou en ligne – EndNote® vous aide à collecter et créer votre recherche plus rapidement. Que vous mettiez à jour un CV ou un programme d'enseignement, que vous envoyiez des demandes de financement ou écriviez un manuscrit, EndNote® vous apporte les outils pour organiser et partager votre recherche où que vous soyez. Votre travail gagne ainsi en efficacité.



Distributeur officiel
en Suisse

SCIENTIFIC SOLUTIONS SA

Rue du Midi 2 - CH 1009 Pully-Lausanne - Suisse

tél. : +41 (0) 21 711 15 20 www.scientific-solutions.ch



Distributeur officiel
en France, Belgique
et au Luxembourg

RITME

34, bd Haussmann - 75009 Paris - France

tél. : +33 (0) 1 42 46 00 42 www.ritme.com

ZOOLOGIE-SOCIOLOGIE

Le chien et l'homme

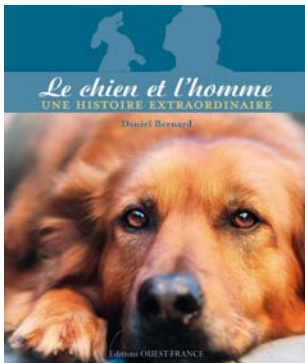
Daniel Bernard

Ouest-France, 2014
[120 pages, 22,90 euros]

L'auteur, docteur en anthropologie sociale et historique, nous propose un nouveau regard sur les liens fascinants entre

les chiens et nous qui leur ressemblons si peu, mais qui nous entendent si bien avec eux !

L'histoire naturelle et le processus de domestication sont à peine effleurés dans les trois premières pages d'introduction. C'est heureux puisque l'auteur, dont ce n'est ni la spécialité ni le centre d'intérêt, a laissé de côté la révolution en cours des connaissances sur la biologie et l'évolution du chien. Cet apport de la biologie moléculaire, de la génétique, de l'éthologie a des implications jusque dans notre évolution : les presque 400 races de chiens



n'ont qu'un seul ancêtre, le loup ; le meilleur ami de l'homme aurait été sélectionné par nos ancêtres depuis au moins 33 000 ans, soit 23 000 ans avant l'agriculture et l'élevage.

Estimant que l'origine du chien reste obscure (mais en la situant il y a 12 000 ans), l'auteur se contente de constater que les accouplements fertiles entre chiens et loups prouvent leur étroite parenté, alors que les

différentes espèces du genre *Canis* sont interfécondes.

Les 110 pages qui suivent portent sur le chien dans l'histoire, son utilité pour l'homme, la symbolique et la représentation du chien dans la bande dessinée ou le cinéma, domaines où l'auteur est plus à son aise et excelle.

L'iconographie est remarquable, avec d'incroyables photos d'époque d'un corbillard canin à vélo, de chiens ambulanciers ou de soldats (par exemple celle d'un évier en armure de guerre), de combats de chiens contre un taureau ou des rats. Le chien dans les différentes civilisations ou époques est bien connu, mais les illustrations sont judicieusement choisies, en particulier concernant le monde antique. Deux pages de citations témoignent de cette connaissance du sujet par l'auteur et certaines même n'étaient inconnues, comme celle d'Octave Mirbeau (« Les chiens, qui ne savent rien, comprennent ce que nous disons, et nous qui savons tout, nous ne sommes pas encore parvenus à comprendre ce qu'ils disent. ») ou celle de Jules Renard : « Entre le chien et son maître, il n'y a qu'un saut de puce. ». Bref, un agréable livre pour offrir à un ami des chiens.

Pierre Jouventin

Directeur de recherche émérite
au CNRS, Montpellier

BIOLOGIE

Pasteur et Koch

Annick Perrot
et Maxime Schwartz

Odile Jacob, 2014
[240 pages, 24,90 euros]

Louis Pasteur et Robert Koch sont les deux grands fondateurs de la bactériologie. Le premier est français, le second

allemand. Ils ont tous deux réussi à montrer que certaines maladies sont dues à des micro-organismes. Mais le courant ne passe pas entre eux. À cause de maladresses, d'une mauvaise circulation de l'information scientifique, de



malentendus d'origine linguistique, de problèmes d'égo et de sentiments nationalistes exacerbés par la guerre franco-allemande de 1870, les deux savants entretenaient une relation exécrable. Cependant, cette inimitié n'a pas toujours été stérile : elle a conduit les deux chercheurs à se surpasser, afin de mieux triompher de l'autre, et aurait joué un rôle positif dans leurs découvertes.

Quand Koch fait irruption dans le monde de la recherche, Pasteur, de vingt ans son aîné, est déjà un savant reconnu. La première fâcherie a lieu en 1876, à propos de la maladie du charbon qui décime le bétail. Koch vient de montrer qu'elle est causée par une bactérie mais, en rendant compte de ses résultats, il omet de citer la découverte préalable de Pasteur des spores bactériennes. Quant à ce dernier, il présente ensuite la découverte de l'étiologie de cette maladie en mettant en avant le rôle de savants français, sans reconnaître celui, prépondérant,

de Koch. Ces maladresses, voire mesquineries, annoncent d'autres tensions. Mais les deux savants s'opposent aussi pour des raisons plus profondes. Notamment, Koch reste sceptique vis-à-vis de l'idée que l'on puisse atténuer la virulence des microbes, alors que Pasteur, adoptant une conception moins fixiste du vivant, s'efforce de montrer le contraire. L'opposition de son confrère allemand redouble d'ailleurs son ardeur à montrer que les espèces bactériennes se transforment. L'histoire qui donnera raison et cette caractéristique jouera un rôle clef dans le développement de la vaccination.

La rivalité a donc été une fructueuse source d'émulation. En même temps, on ne peut s'empêcher de se demander si, à certains moments, une franche collaboration entre les deux savants n'aurait pas été préférable. Quoi qu'il en soit, en racontant l'histoire des débuts de la bactériologie à travers la rivalité de ses deux fondateurs, cet ouvrage nous offre un récit vivant, didactique, très agréable à lire et qui a le mérite de rappeler la dimension humaine de l'activité scientifique. En ce sens, c'est un ouvrage parfaitement réussi...

Thomas Lepeltier

Chargé de cours, Université d'Oxford

EGYPTOLOGIE

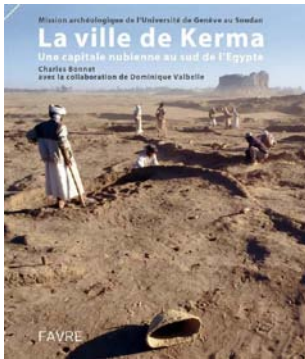
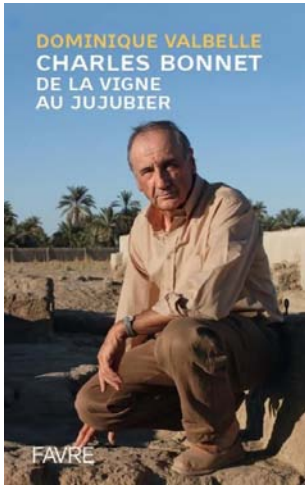
Charles Bonnet

Dominique Valbelle

Favre, 2014
[333 pages, 20 euros]

Un vieu neu ordinaire « de la vigne au jujubier », comme l'indique le titre, de la Suisse au Soudan, mais toujours

sous le signe de l'archéologie, tel est le parcours de Charles Bonnet. De Tabo à Kerma et Doukki Gel, autant de noms exotiques, le



repas d'exception, promenades, moments de repos... Autour de Charles Bonnet, c'est toute une équipe dont il partage l'aventure et dont il devient familier, grâce au parti pris de l'auteur, qui mêle récits, anecdotes, interviews et conversations à bâtons rompus, désignant tous les personnages par leur prénom, comme s'ils nous étaient familiers. On découvre une société inconnue, avec ses grands seigneurs et ses petites gens, auxquels Charles Bonnet et son équipe ont rendu une mémoire. Au vrai dire pas si inattendue: la ville antique ne se nommait-elle pas «la ville du jububier»?

La ville de Kerma

Charles Bonnet

Favre, 2014
(267 pages, 44 euros).

Cet ouvrage, écrit avec la collaboration de Dominique Valbelle, est le troisième d'une série de publications de la Mission archéologique de l'Université de Genève au Soudan. Il fait le bilan et la synthèse de 60 années de fouilles à Kerma, aujourd'hui au Soudan, ancienne capitale du premier royaume de Nubie, le voisin méridional de l'Égypte.

La ville de Kerma, mise au jour puis restaurée par l'équipe de Charles Bonnet, se révèle aux yeux du lecteur. Après une rapide introduction présentant le site, la méthodologie et les matériaux et techniques de construction, la ville, dont est donné un plan d'ensemble, est présentée secteur par secteur – 64 en tout. Chacun d'eux comporte un plan, avec des couleurs indiquant les différentes

périodes d'occupation, cinq au total, du Kerma ancien au Kerma classique, réparties sur un millénaire, de 2450 à 1450 avant notre ère. Un plan de situation précise sa position dans l'ensemble des secteurs. D'excellentes photographies montrent l'état actuel après consolidation et restauration. En guise de conclusion, sont mis en exergue les aspects les plus remarquables de la cité: les défenses, particulièrement élaborées et paraissant disproportionnées par rapport à l'armement utilisé, les circulations, enfin l'habitat et les lieux de culte, chapelles et temple.

Magnifiquement illustré, ce parcours permet d'aborder une architecture singulière, tant par ses plans que par ses techniques, empruntées pour partie au grand voisin égyptien, pour partie aux traditions indigènes, avec des huttes circulaires en matériaux légers à côté de constructions en briques crues. Quelques images de portes ou de maisons contemporaines permettent d'imaginer l'élévation de ces structures.

L'aridité de la fouille archéologique débouche sur des résultats étonnamment suggestifs: on retrouve ici des zones de réunion et de repas sur des tables ovales, à des ateliers, là encore une batterie de fours de boulanger, des silos un peu partout... Bref, la vie quotidienne devient sensible, palpable. Rendu très accessible par un style clair et précis, malgré beaucoup de rigueur scientifique, l'exposé rend proche une culture lointaine dans l'espace et dans le temps.

Nadine Guilhou

Université de Montpellier-II



Biodiversité: vers une sixième extinction de masse

R. Billé, Ph. Cury, M. Loreau
et V. Maris

La Ville Brûle, 2014 – (200 pages, 20 euros).

animé par le journaliste scientifique Sylvestre Huet, ce débat-livre fait ressentir les pensées de trois chercheurs et d'un philosophe préoccupés par l'extinction de plus en plus rapide des espèces vivantes. Après avoir largement traité de l'aspect scientifique du phénomène, les intervenants bordent le débat de société auquel ils participent. Comment résumer leur conclusion? Il faut cesser de placer la nature au milieu de l'humanité, et replacer l'homme au sein de la nature. Ainsi, nous pourrions changer de trajectoire.



Un si brillant cerveau

Steven Laureys

Odile Jacob, 2015
(294 pages, 23,90 euros).

L'altération de la conscience, quand elle enferme un être en lui-même, est difficile à mesurer. C'est là tout l'objet des recherches menées par l'équipe de l'auteur, à l'Université de Liège. Il nous y sensibilise dans ce livre tout en nous expliquant, à la faveur de cas cliniques et de rappels théoriques et éthiques, les principes de diagnostic de cas désespérants qu'il a pu en tirer. Une problématique difficile, que l'on est contraint d'affronter: la médecine moderne compense assez bien les défauts organiques mais mal ceux du cerveau!



Perturbateurs endocriniens

Marine Jobert
et François Veilleret

Lachet-Chastel, 2015
(126 pages, 12 euros).

Les auteurs de ce livre ne sont pas des scientifiques, et c'est en convaincus qu'ils traitent de la menace d'une perturbation à grande échelle de nos glandes endocrines par les plastiques. Pour autant, ils le font bien, alors que les indices de ce phénomène sont très inquiétants. Leur livre est par conséquent bienvenu. D'autant plus que leur partie «Quelques conseils pour se mettre à l'abri» semble instructive, raisonnable, bien documentée.

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



PERTES DE TEMPS

Supposons que je prenne l'avion pour le Bahreïn, mais que le pilote atterrisse au Qatar sans en informer les passagers. Rien que je ne lise pas l'arabe, divers indices me feront sans doute assez vite deviner la mustification.

Supposons que, la machine à voyager dans le temps ayant été mise au point, je prenne un billet pour l'an 702, mais que je descende à l'arrêt « An 723 ». Il est possible que je revienne sans m'être rendu compte de mon erreur. Le calendrier julien était en vigueur, la langue hésitait entre le latin et le roman. Saurais-je demander la date du jour ? Comprendrais-je la réponse ?

Plus grave. Supposons que je désire visiter le XXX^e siècle, mais que le transporteur me débarque à une date moins lointaine, donc moins coûteuse pour lui, disons le XXVIII^e siècle. Pour peu que la langue ait changé et que l'ère chrétienne ait été remplacée par une autre, je n'aurai aucun moyen de déceler l'escroquerie.

Voyager dans le temps ? Parfait. A condition d'être certain que l'époque à laquelle on descend de l'engin est bien celle annoncée. Pour cela, il faudra qu'il ait été inventé le GPS temporel, c'est-à-dire un appareil indiquant à quel instant exact de l'histoire de la Terre se trouve celui qui le consulte.

De toute façon, n'attendons pas trop de cette entreprise. Comme l'a remarqué un pilier de bistrot fin psychologue : « Si

on arrive à voyager dans le temps, consomme comme on est, on partira tous en même temps et faudra cinq heures pour aller dans dix minutes. » (Jean-Marie Gourio, *Brèves de comotair*, Laffont, 1995.)

UN FRANÇAIS PARFAIT, MAIS AVEC DES DÉFAUTS

Écoutant un adulte s'exprimer en français, je n'ai aucune raison de dire : « Il parle français parfaitement. » Sauf si l'attention est alertée par un petit rien – en général, une infime trace d'accent : le locuteur est étranger. Ainsi, c'est une imperfection à peine perceptible qui mène à remarquer que son français est parfait.



Écoutant un adulte s'exprimer en français, je n'ai aucune raison de dire : « Il parle français comme vous et moi. » Sauf si je sais qu'il est étranger. Sinon, ce fait m'échappera.

Conclusion : parler « parfaitement », c'est faire preuve d'une moindre maîtrise du français que parler « comme vous et moi ».

DE L'ESPRIT DES LOIS DE LA PHYSIQUE

Les lois, au sens juridique du terme, varient selon les pays et les siècles. Elles ont des auteurs, dont on peut évaluer les intentions. Elles sont appliquées avec plus ou moins de fermeté. Transgresser les lois est concevable, et



ceux qui le font sont censés savoir quelles peines ils encourrent.

Les lois de la physique sont exactement inverses. Si elles varient, ce n'est pas à l'échelle des pays ni des siècles, mais à l'échelle quantique ou à celle de l'Univers et de ses premiers instants. On ne sait rien des intentions de leur(s) éventuel(s) auteur(s).

Elles sont inflexibles. Une pierre restant en l'air quand on la lâche est inconcevable. La peine qu'elle encourrait à transgresser ainsi la loi de la gravitation est encore moins concevable !

Si Dieu a créé l'Univers et l'a doté de règles, l'emploi en physique du mot loi s'explique : voir Dieu en législateur est une analogie classique. Mais si on tient Dieu hors du champ des sciences, cet emprunt au droit pour décrire le comportement de la nature est étranger. Bien d'autres mots étaient

possibles : les usages de la nature, ses habitudes, ses régularités. Mieux encore, on aurait pu inventer un terme spécifique.

Certains diront que, les acceptions juridique et scientifique n'ayant rien à voir, parler de loi en physique n'est pas plus troublant que, par exemple, parler d'arbre en mathématiques. Je ne suis pas d'accord. Les arbres mathématiques ont une ressemblance avec ceux des forêts. Celle-ci permet de comprendre l'emprunt du mot arbre par les mathématiciens et de ne pas lui attribuer plus de sens qu'il n'a. Parce qu'on voit la ressemblance, on voit aussi où elle s'arrête.

L'éventuelle ressemblance entre loi scientifique et loi juridique est moins manifeste. L'explicitation mène à expliciter aussi en quoi elles diffèrent, donc à préciser quelle conception on se fait de la nature.



COLLECTION PLAISIRS DES SCIENCES

DES OUVRAGES
ACCESSIBLES,
LUDIQUES ET
RICHEMENT
ILLUSTRÉS

NOUVEAU

DE L'ATOME IMAGINÉ À L'ATOME DÉCOUVERT

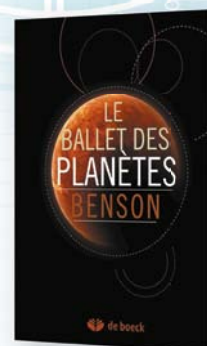
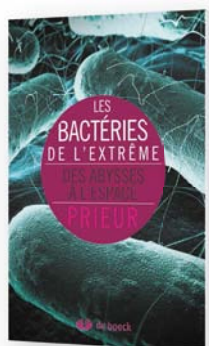
CONTRE LE RELATIVISME

Hubert Krivine et Annie Grosman

Préface d'Étienne Klein

144 pages – 19 € – 978-2-8041-9072-9

Une histoire de 25 siècles d'arguments échangés entre tenants et opposants à l'atomisme. En retraçant les dernières étapes de sa résolution, les auteurs montrent comment la vérité scientifique se construit et continue à vivre par une confrontation permanente entre théories et expériences.



LES BACTÉRIES DE L'EXTRÊME

Daniel Prieur

192 pages – 23 €

978-2-8041-8824-5

L'auteur explore les environnements terrestres et extra-terrestres les plus extrêmes et sonde les plus infimes organismes pour comprendre l'émergence de la Vie sur la Terre, ou sur d'autres planètes.

L'INVENTION DU RÉEL

Damien Gayet

216 pages – 18 €

978-2-8041-8815-3

L'univers de l'astronomie est-il vraiment le nôtre ? Naviguant de l'Anti-Terre aux exoplanètes, ce livre est une plongée vertigineuse dans l'une des questions les plus troublantes de la philosophie.

C'EST QUOI LA CHIMIE ?

Peter William Atkins

Trad. : Paul Depovere

122 pages – 17 €

978-2-8041-8855-9

Un exposé clair, concis et accessible pour tous ceux qui voudraient comprendre ce qu'est la chimie.

LE BALLET DES PLANÈTES

Donald Benson

Trad. : Benoît Clenet

200 pages – 17 €

978-2-8041-8492-6

Accessible à tous, cet ouvrage vous apprendra tout du mouvement des planètes, sous son aspect historique.

OPEN INNOVATION

by



COSMETIC VALLEY FRANCE

**Submit your projects
and expertises**

Meet major companies at



The international Perfumery and Cosmetic innovations exhibition

15th and 16th october 2015 - CARROUSEL DU LOUVRE - PARIS

Information and Registration on www.cosmetic-360.com
contact@cosmetic-360.com - Tel: +33237211211