

Détecter la lumière
des étoiles éteintes

L'insolite adaptation
de l'ours polaire

Champagne : un
océan dans une flûte

■ POUR LA

SCIENCE

Janvier 2016 - n° 459

www.pourlascience.fr

Edition française de Scientific American

Pourquoi rêvons-nous ?

Les réponses
inattendues des
neurosciences



M 02687 - 459 - F: 6,50 € - RD



Belgique : 7,20 € - Canada : 10,95 CAD - Guadeloupe/St Martin : 7,30 € - Guyane : 7,30 € - Italie : 7,20 € - Luxembourg : 7,20 €
Maroc : 60 MAD - Martinique : 7,30 € - TOM : 980 XPF - Port. cont. : 7,20 € - Réunion : 9,30 € - Suisse : 12 CHF - Tunisie : 8,40 DT



Permettre à votre épargne de faire des petits c'est aussi ça GMF.

Une épargne performante et sûre pour préparer les projets de demain. Avec les contrats d'assurance vie et les supports en euros GMF, vous vous constituez petit à petit une épargne performante qui vous permettra de financer tous vos projets d'avenir, en toute sécurité.



Rendez-vous sur www.gmf.fr
ou appelez le

N° Vert 0 800 88 11 62

APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE

* 3,05 %, taux servi en 2013 : frais de gestion déduits et avant prélèvements sociaux pour tous les contrats d'assurance vie en euros GMF et les supports réguliers de Multéo et de Certigo. Les performances passées ne préjugent pas des performances futures.

GMF VIE - Société anonyme au capital de 186 966 736 euros entièrement versé - Entreprise régie par le Code des assurances - 315 814 806 R.C.S. Pontoise
Siège social : 1, rue Raoul Dautry - CS 40003 - 95122 Ermont Cedex.



POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

1 rue Férou - 75228 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

Directrice artistique : Céline Lapert

Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Joubert

Marketing : Laurence Hay et Ophélie Maillet

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique : Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Aud Bruyère, Brigitte Courtois, Hervé Dole, Romain Gicquaud

Anne-Lise Lamy, Hervé Le Guyader, Bernard Marty, Christian

Mazelle, Olivier Mousis, Christophe Pichon, Grant Raisbeck,

Dans Ringström, Mélanie Roffet-Salque, Pauton Sheets, Loïc Villard

PUBLICITE France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

jf.guillotin@pourlascience.fr

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

BONNEMENTS

Bonnement en ligne : <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel : pourlascience@abopress.fr

Téléphone : 03 67 07 98 17

Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science,

19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES :

Pour la Science, 628 avenue du Grain d'Or, 41350 Vineuil

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél. : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

Magazine disponible sur www.direct-editeurs.fr

Canada : Edipresse : 945 avenue Beaumont, Montréal,

Québec, H3N 1W3 Canada.

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

Belgique : La Caravelle : 303 rue du Pré-aux-Dies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8 rue Férou - 75228 Paris Cedex 06.

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros

France métropolitaine : 59 euros Europe : 71 euros

Reste du monde : 85,25 euros

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina.

Executive editor : Fred Guteri. Design director : Michael Mrak. Editors :

Sticky 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, 75228 Paris Cedex 06.

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

duction, d'adaptation et de représentation

réservés pour tous les pays. La marque et le

nom commercial « Scientific American » sont

la propriété de Scientific American, Inc. Li

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

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

dit de reproduire intégralement ou partiellement

la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou

du Centre français de l'exploitation du droit de co

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



Maurice Mashaa
rédacteur en chef

Une vie de rêves...

Non, nous ne rêvons pas quatre ou cinq fois seulement dans la nuit : en fait, cette activité mentale occupe près du quart de notre vie. Non, nous ne rêvons pas uniquement lors du sommeil dit paradoxal. Non, les rêves érotiques ne sont pas fréquents. Non, les rêves ne se construisent pas instantanément au réveil...

L'univers du rêve paraît si étrange et mystérieux que ce phénomène a été et est toujours l'objet d'un bon nombre d'idées fausses. Les songes se sont vu attribuer un sens divinatoire ou prémoniteur depuis la nuit des temps, dans toutes les civilisations. Ce n'est qu'avec Freud, à partir de la fin du XIX^e siècle, que leur étude sérieuse a débuté. Le fondateur de la psychanalyse voyait en eux l'expression des désirs refoulés de l'individu, désirs formulés dans le rêve de façon indirecte, symbolique, en raison de

La vision qui émerge est très différente de celle de la psychanalyse

l'autocensure qu'impose le « surmoi ». L'idée, séduisante par sa simplicité et par le cadre interprétatif qu'elle offre, s'est largement imposée au XX^e siècle, jusque dans la culture populaire.

L'interprétation psychanalytique des rêves n'est cependant pas le fin mot de l'histoire. L'article de la spécialiste Isabelle Arnulf montre que les neurosciences renouvellent profondément le sujet (voir pages 26 à 35). La masse de données scientifiques recueillies fait émerger une compréhension du rêve bien différente de celle de la psychanalyse. Même s'il reste encore beaucoup à étudier et à éclaircir, le rêve se révèle remplir de multiples fonctions : il aide l'individu à anticiper, à affronter les menaces, à gérer les émotions négatives, à consolider ses souvenirs, à comprendre les autres... De quoi donner encore plus de substance à la belle phrase de Gaston Bachelard : « On n'a jamais bien vu le monde si on n'a pas rêvé ce que l'on voulait. »

édité

Actualités

Des tétrapodes disparus régénéraient leurs membres
Quand l'environnement façonne les langues
La cire d'abeille, utilisée depuis au moins 10 000 ans



Équations d'Einstein : une conjecture démontrée
Surdité liée au bruit : le rôle clé de la peïvakine

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

Point de vue
Pénurie d'antivenins en Afrique : un problème financier... et culturel
Jean-Philippe Chippaux
Entretien
Financement de la recherche : « L'ANR ne fait pas bouillonner les idées comme elle le devrait »
Patrick Petitjean

Homo sapiens informaticus
Aux origines des trolls
Gilles Dowek

Cabinet de curiosités sociologiques
Mensonges privés, vérités publiques
Gérald Bronner

Lu sur SciLogs.fr
Moins de fèces, moins de phosphore
Jean-Louis Hartenberger

Le numéro comporte deux encarts d'abonnement
 Pour la Science brochés sur la totalité du tirage.
 En couverture : © Shutterstock.com/Hamara PathDo

À LA UNE

26

NEUROSCIENCES

Pourquoi rêvons-nous ?

Isabelle Arnulf

Les neurosciences ont ouvert de multiples fenêtres sur le rêve, qui occupe plus du quart de notre vie. En dévoilant ce qu'il contient, elles révèlent peu à peu à quoi il sert.



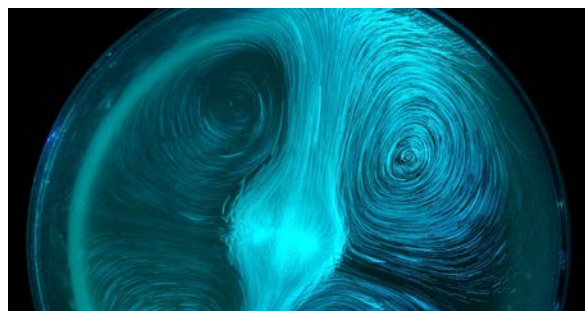
36

PHYSIQUE

In océan dans une flûte de champagne

Gérard Liger-Belair, Clara Cilindre, Fabien Beaumont et Guillaume Polidori

Les effets de condensation observés lors du débouchage d'une bouteille de champagne et les mouvements tourbillonnaires imprimés au liquide par la remontée des bulles rappellent certains phénomènes atmosphériques ou océanographiques.



42

ASTROPHYSIQUE

Détecter la lumière de toutes les étoiles disparues

Alberto Domínguez, Joel Primack et Trudy Bell

Plusieurs générations d'étoiles, aujourd'hui éteintes, ont rempli l'Univers d'un rayonnement ambiant que les astronomes commencent tout juste à détecter.

50 INFORMATIQUE

S'adapter à la cyberguerre

Keren Elazari

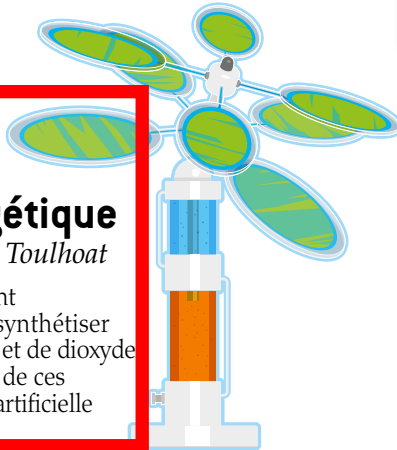
Chaque appareil connecté est une cible potentielle pour les cybercriminels. Les gouvernements ne pourront sécuriser le cyberspace que si les particuliers sécurisent leurs propres équipements.

56 ÉNERGIE

Des carburants solaires pour la transition énergétique

Antoine Fécant et Hervé Toulhoat

En recueillant le rayonnement du Soleil, il est possible de synthétiser des carburants à partir d'eau et de dioxyde de carbone. Les rendements de ces procédés de photosynthèse artificielle s'améliorent peu à peu.



64 ÉCOLOGIE

Faut-il vendre la peau de l'ours polaire ?

Rémy Marion et Farid Benhammou

L'ours blanc, un cousin de l'ours brun adapté à la banquise, est menacé par la réduction et la pollution de son habitat. On peine cependant à quantifier l'impact réel de ces menaces sur ses populations.



70 HISTOIRE DES SCIENCES

Edmond Pâris et la pirogue au bateau à vapeur

Géraldine Barron

Au XIX^e siècle, fasciné par l'ingéniosité des pirogues vues lors de ses voyages, un jeune officier de la Marine se prend de passion pour la construction navale. Le récent bateau à vapeur devient vite son cheval de bataille...

Rendez-vous

78 Logique & calcul

Le problème des 8 reines... et au-delà
Jean-Paul Delahaye

De combien de façons différentes peut-on placer n reines sur un échiquier de taille $n \times n$ dans des positions compatibles ?

84 Science & fiction

Quel animal roule comme Sonic et BB-8 ?

J.-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 Art & science

Et en Amazonie coule la Seine..

Loïc Mangin



89 Idées de physique

Petite force deviendra grande

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

92 Question aux experts

Pourquoi les hommes ont-ils des tétons ?

Andrew Simons

94 Science & gastronomie

Faut-il piquer les viandes ?

Hervé This

96 À lire

98 Blog notes

Les chroniques de Didier Nordon

POUR LA SCIENCE.fr

Lettre d'information



Ne manquez pas

à parution

de votre magazine

grâce à la NEWSLETTER

Notre sélection d'articles

Des offres préférentielles

Nos autres magazines

abonnement



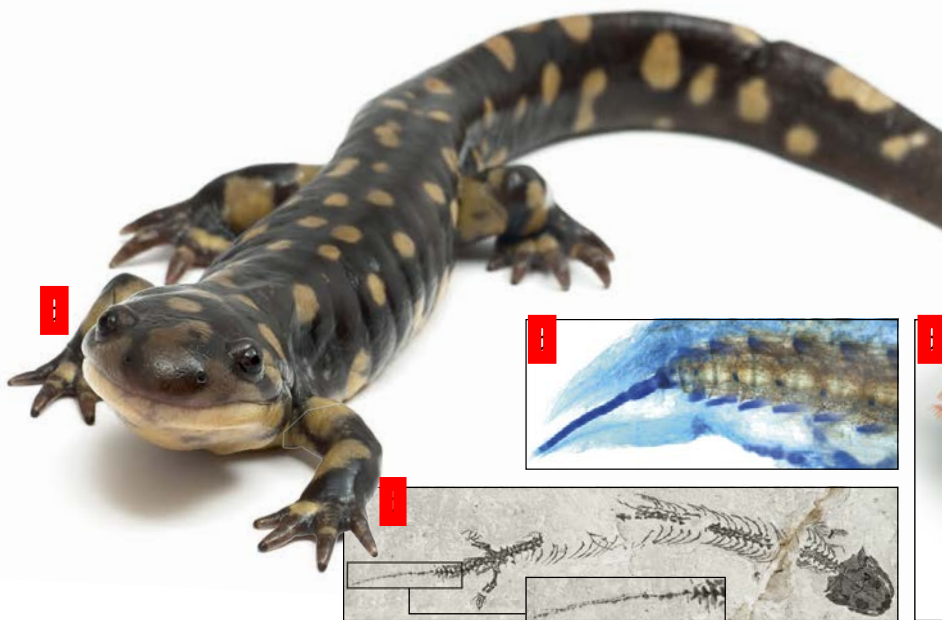
Recevez gratuitement la lettre d'information
en inscrivant uniquement votre adresse mail

sur www.pourlascience.fr

Actualités

Des tétrapodes disparus régénéraient leurs membres

Les salamandres ne sont pas les seuls tétrapodes dont les membres peuvent repousser. Il y a 300 millions d'années, de lointains cousins amphibiens avaient aussi cette faculté.



La queue de la salamandre (a) repousse à l'identique, avec des vertèbres (b). On retrouve ce schéma sur des fossiles d'un ancien amphibien, *Microbrachis* (c). *Micromelerpeton*, un autre amphibien disparu (d), présente des anomalies similaires à celles des pattes régénérées de salamandres.

La salamandre est un cas doublement étrange dans l'histoire de l'évolution. D'abord, elle est le seul tétra-

pode actuel connu capable de régénérer ses pattes et sa queue (le lézard, par exemple, ne régénère que sa queue). Ensuite, son développement diffère de celui des autres tétrapodes: les premiers doigts qui se forment chez la salamandre sont les deux doigts les plus antérieurs (les plus proches de la tête), alors que chez tous les autres tétrapodes actuels connus, ces doigts se forment en dernier. Ces deux curiosités seraient-elles liées? C'est ce que Nadia Fröbisch, de l'institut Leibniz pour la science de l'évolution et de la biodiversité, à Berlin, et ses collègues ont voulu savoir. En recherchant ces propriétés chez des espèces éteintes de tétrapodes, ils ont découvert que la

salamandre a eu des prédécesseurs il y a 300 millions d'années... qui n'étaient pas ses ancêtres directs.

Comment retracer le développement d'espèces éteintes? En rassemblant les fossiles d'une espèce, en les classant du plus jeune individu au plus âgé grâce à leur ossification, puis en regardant la séquence obtenue comme un film retraçant le développement d'un seul individu. En 2007, Nadia Fröbisch et ses collègues avaient ainsi montré qu'un amphibien du Paléozoïque (il y a environ 300 millions d'années), *Apateon*, développait ses doigts de la même façon que les salamandres.

Ils ont cette fois retrouvé un développement similaire chez deux autres amphibiens de la même époque, *Micromelerpeton* et *Sclerocephalus*, mais plus éloignés de la salamandre dans l'arbre

phylogénétique des tétrapodes. Cette propriété existait donc très probablement chez leur dernier ancêtre commun, à la tête d'un large groupe les englobant (les temnospondyles), voire chez un ancêtre plus lointain.

La régénération des membres, elle, se repère grâce aux malformations qu'elle introduit. Chez la salamandre, elle produit parfois des doigts supplémentaires, la fusion de doigts ou de phalanges, ou des phalanges de diverses tailles. Si *Apateon* et *Sclerocephalus* n'ont pas encore révélé s'ils régénéraient leurs membres, les biologistes ont repéré de telles anomalies chez *Micromelerpeton*, signe que cet amphibien en avait bien la capacité. Cette dernière existait donc elle aussi déjà il y a 300 millions d'années, soit 80 millions d'années avant le premier

fossile connu de salamandre, voire plus tôt.

Plus étonnant encore, les biologistes ont montré que deux amphibiens aussi anciens, les microsaures *Hylopletes* et *Microbrachis*, régénéraient leur queue selon un processus similaire à celui de l'œuvre chez la salamandre. Or dans l'arbre des tétrapodes, les microsaures sont bien plus proches des amniotes, la branche qui englobe les mammifères et les sauropsides (oiseaux, tortues, crocodiles, serpents, lézards...), que les salamandres et de *Micromelerpeton*. On pensait donc trouver un mécanisme de régénération plus proche de celui du lézard.

Lorsqu'un lézard perd sa queue, celle qui repousse n'est pas aussi perfectionnée que la première. Formée d'un unique tube de cartilage, elle reste

Linguistique

Quand l'environnement façonne les langues

Le rotokas, une langue de Nouvelle-Guinée, n'a que 6 consonnes et 5 voyelles, tandis que le khoon, parlé dans le sud de l'Afrique, en compte respectivement 128 et 28. Comment expliquer une telle variabilité ? Une collaboration internationale a montré que l'environnement est en partie responsable. Christophe Coupé, du laboratoire Dynamique du langage (DDL), à Luon, a contribué à cette étude. Il nous en présente les résultats.

fonctionnelle en tant que balancier, mais n'a plus la souplesse de la queue d'origine, constituée de vertèbres articulées. La salamandre, elle, produit une queue identique à celle amputée, avec vertèbres, muscles et innervation. Lors de sa régénération, elle apparaît comme un fin filament qui se segmente peu à peu, et c'est cette signature que les biologistes ont retrouvée sur les fossiles des deux microsaures.

Ainsi, la capacité à se régénérer est probablement un trait bien plus ancien que 300 millions d'années. Un ancêtre tétrapode commun des salamandres et des microsaures (et donc des amniotes) devait en être doté, voire un ancêtre plus lointain encore, un sarcoptérygien, commun aux tétrapodes et aux dipneustes. Ces poissons à poumons sont eux aussi capables de régénérer leur queue... La propriété aurait ensuite été perdue au moins une fois au cours de l'histoire évolutive des tétrapodes, le long de la lignée qui conduit aux amniotes.

Quant au développement étrange des doigts des salamandres, s'il a coexisté 300 millions d'années avec la capacité à se régénérer chez le *Micromelerpeton*, le *Sclerocephalus* et la salamandre, on n'en trouve pas trace chez les microsaures. En revanche, les grenouilles, pourtant plus proches cousines des salamandres que le *Micromelerpeton*, ne se développent pas comme elles : chez le têtard en cours de métamorphose, les doigts antérieurs apparaissent en dernier. Et pour brouiller encore les pistes, le têtard est capable de régénérer sa queue... tant qu'il n'entame pas sa métamorphose. L'histoire de la régénération des tétrapodes est loin d'être close !

Marie-Neige Cordonnier

Nature, vol 527, pp. 231-234, 2015

Comment avez-vous eu l'idée de tester l'influence de l'environnement sur les langues ?

Christophe Coupé : Tout part d'une hypothèse qualifiée d'adaptation acoustique, proposée par l'ornithologue américain Eugene Morton dans les années 1970. Selon cette hypothèse, le système de communication utilisé par une espèce animale évolue et s'adapte à l'environnement, à l'instar d'un organisme vivant. Ainsi, les animaux ajustent leurs vocalisations pour qu'elles se propagent de façon optimale dans leur habitat. Cette hypothèse a globalement été validée et, depuis quelques années, on cherche à l'appliquer à l'espèce humaine.

Quelles langues avez-vous étudiées ?

C. C. : Nous avons travaillé sur environ 630 langues de la base de données LAPSyD, développée par notre laboratoire, en collaboration avec le linguiste américain Ian Maddieson. Pour chaque langue, cette base contient une fiche d'identité phonologique : inventaire des sons, complexité des syllabes (liée au nombre de consonnes et de voyelles qui les composent), etc. Nous avons exclu de l'étude les langues parlées sur un trop grand espace, tels l'anglais et le français, car un vaste territoire peut

rassembler des environnements très différents les uns des autres.

Comment avez-vous pris en compte les paramètres environnementaux ?

C. C. : Depuis une dizaine d'années, de plus en plus de données satellitaires sont mises à disposition. Nous avons ainsi obtenu des mesures précises de la couverture forestière, de la température, de l'altitude et des précipitations pour



Christophe Coupé, chargé de recherche au CNRS

l'ensemble des régions émergées de la planète. Nous avons croisé ces données avec celles issues de recensements linguistiques, pour connaître le nombre de locuteurs de chaque langue, ainsi que l'aire géographique qu'ils occupent, avec l'aide d'un logiciel de cartographie numérique.

Et qu'avez-vous trouvé ?

C. C. : Nous avons montré qu'en moyenne, plus la température est élevée et la végétation dense, moins les consonnes sont nombreuses.

Le nombre de voyelles, lui, ne subit pas d'impact. La complexité des syllabes tend aussi à diminuer quand la densité de la végétation augmente.

Comment l'expliquez-vous ?

C. C. : Les hautes fréquences se propagent moins bien quand la végétation est dense et la température élevée. Or les consonnes diffèrent les unes des autres en bonne partie par les variations dans leurs composantes spectrales de hautes fréquences. Elles sont donc plus difficiles à distinguer dans ces conditions, ce qui explique qu'elles soient moins nombreuses. C'est d'ailleurs parce que nous avons ce mécanisme physique à l'appui de nos corrélations que nous pensons qu'elles traduisent une relation causale.

Quelle est l'importance de l'effet constaté ?

C. C. : Il n'est pas très fort, mais bien réel. Pour les 630 langues analysées, nous estimons que les différences de température et de végétation expliquent un peu plus de 10 % des variations du nombre de consonnes. De multiples autres facteurs, notamment sociaux, s'ajoutent pour expliquer la variabilité des sons des langues.

Guillaume Jacquemont

E. Underwood, Science, 4 novembre 2015

La cire d'abeille, utilisée depuis au moins 10 000 ans

Des tessons de poterie néolithique provenant du pourtour méditerranéen et qui portent des traces de cire témoignent de l'ancienneté de la relation homme-abeille, voire de celle de l'apiculture.



Des abeilles mellifères sur des céramiques (ci-dessus) et un essaim sauvage posé sur une branche (à droite). Tout à droite, la célèbre représentation d'une cueillette de miel paléolithique (grotte de l'Araignée près de Valence, en Espagne).

Depuis la découverte de traces de ruches sur le site cananéen de Tel-Rehov, dans le nord d'Israël, on sait que l'apiculture a 3 000 ans au moins. Comment en savoir plus ?

La cire, mélange complexe de composés aliphatiques (des chaînes carbonées), peut être identifiée par chromatographie en phase gazeuse et par spectrométrie de masse. Pour mieux situer dans le temps la relation homme-abeille, une équipe de 65 chercheurs coordonnée par Mélanie Roffet-Salque, de l'université de Bristol, a analysé 6 400 tessons issus de toute une série de pays méditerranéens et européens afin d'y rechercher des traces de cire.

La plus ancienne attestation de cire d'abeille dans une poterie provient du Néolithique anatolien, puisque les chercheurs en ont identifié deux résidus sur des tessons du VII^e millénaire avant notre ère. Des résidus ont également été trouvés dans des tessons du VI^e millénaire en Anatolie du Nord, ce qui suggère un long usage de la cire d'abeille

en Anatolie au début du Néolithique.

Par ailleurs, le très grand nombre de tessons de poterie portant des résidus de cire identifiés pour les Balkans suggère qu'au VII^e millénaire et avant, les paysans du courant méditerranéen de néolithisation employaient souvent le produit de la ruche. Il en était de même chez ceux du courant danubien de néolithisation, des résidus ayant été identifiés dans un nombre de tessons du Rubané (culture dite aussi à céramique linéaire) provenant d'Autriche, d'Allemagne et de Pologne.

Parvenus sur le territoire actuel de la France, les courants danubien et méditerranéen ont fusionné pour donner la culture chasséenne (-4200 à -3500), dont les paysans utilisaient aussi la cire, ont constaté les chercheurs. De très nombreux tessons portant des traces de cire ont aussi été identifiés sur des sites slovènes du V^e millénaire avant notre ère. Le Néolithique du sud de l'Angleterre aussi a livré sept tessons à des résidus de cire. Curieusement,

aucune trace de l'usage de cire n'a été trouvée en Espagne pour le moment, mais un site algérien du V^e millénaire avant notre ère en a livré.

Que conclure ? Le contact avec la cire d'abeille n'implique pas qu'il y ait eu apiculture. Les chasseurs paléolithiques ont sans doute très tôt appris à enfumer les ruches pour y prélever des rayons de miel. Une représentation de cette activité vieille de 8 000 ans a été retrouvée dans la grotte de l'Araignée, près de Bicorp, non loin de Valence en Espagne. Pour autant, l'attestation massive de contact avec la cire dans les courants de néolithisation méditerranéen et danubien suggère que ces produits de la ruche étaient à l'emploi fréquent, sinon quotidien. Étant donné que la chasse au miel détruit les ruches sauvages, il est vraisemblable que nos ancêtres aient très tôt appris à se ménager un approvisionnement régulier en miel. Au Levant, sans doute dès les débuts du Néolithique.

François Savatier

Nature, en ligne le 11 novembre 2015.

20

mille espèces

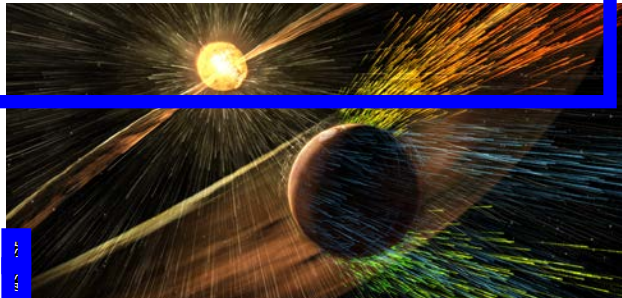
d'abeilles sauvages sont connues. Seules quelques-unes d'entre elles font du miel en quantité*

Astronomie

L'érosion de l'atmosphère martienne en action

Il y a plus de 4 milliards d'années, l'eau coulait sur Mars; mais aujourd'hui, les anciens océaux fluviaux de la planète rouge sont asséchés. À cause d'une atmosphère ténue, la pression est trop faible et la température trop basse pour que de l'eau liquide soit présente (sauf dans des conditions très rares). Que s'est-il passé? La sonde *Maven* de la Nasa a été envoyée en orbite autour de la planète rouge pour comprendre l'évolution de l'atmosphère martienne. Bruce Jakosky, de l'université du Colorado, et ses collègues dont plusieurs chercheurs du CNRS, de l'IRAP et de l'université Paul Sabatier, à Toulouse, et du LATMOS, à Paris) ont analysé les mesures enregistrées durant la première année de la sonde autour de Mars.

Comme la Terre, la planète rouge avait un champ magnétique global, qui constituait un bouclier contre les rayons cosmiques et le vent solaire. Or ce bouclier a disparu il y a environ 4 milliards d'années. L'atmosphère, exposée



Cette simulation représente les particules de l'atmosphère martienne arrachées à la planète lors d'une éruption solaire.

au vent solaire – un flux de particules énergétiques émises par l'étoile –, a commencé à s'éroder. Les données de la sonde *Maven* précisent ce processus. Le vent solaire arrache en permanence des particules à l'atmosphère de Mars, à raison de 100 grammes par seconde. Cette action, prolongée sur plusieurs milliards d'années, suffit pour expliquer la perte d'une grande partie de l'atmosphère de la planète rouge.

En outre, en mars 2015, une éruption solaire a été enregistrée par la sonde *Maven*. La perte de

matière a augmenté d'un facteur 10 par rapport à la moyenne, et peut-être d'un facteur 100 au plus fort de l'éruption, d'après les modèles.

Ainsi, les éruptions solaires amplifient l'érosion permanente de l'atmosphère. Leur contribution pourrait avoir été encore plus importante il y a 4 milliards d'années, lorsque le Soleil était beaucoup plus sujet à de telles éruptions.

Sean Baillly

Science, vol. 350, n° 6261, 6 nov. 2015

Les satellites de Duchenne

La myopathie de Duchenne est une maladie génétique qui touche chaque année 150 à 200 garçons nouveau-nés en France. Des mutations sur le gène d'une protéine contribuant à l'intégrité des fibres musculaires, la dystrophine, empêchent la production. Fragilisés, les muscles s'abîment à chaque contraction, et les cellules souches des fibres – les cellules satellites –, qui produisent de nouvelles cellules musculaires, sont peu à peu dépassées. On pensait que les cellules satellites n'étaient pas elles-mêmes touchées par la maladie, mais Nicolas Dumont, de l'université d'Ottawa, et ses collègues ont montré chez la souris que l'absence de dystrophine les perturbe aussi. Habituellement, lorsque leur transformation en cellules musculaires est activée, les cellules satellites se polarisent (elles deviennent asymétriques), ce qui entraîne leur division asymétrique. Sans dystrophine, elles ne se polarisent plus et produisent dix fois moins de précurseurs des cellules musculaires.

Biologie

Comment survivre sans neurones

L'hydre d'eau douce est un organisme cnidaire capable de survivre même lorsqu'il est privé de neurones. Comment parvient-il? L'équipe de Brigitte Galliot, de l'université de Genève, a montré que certaines de ses cellules se transforment pour diversifier leur activité.

Les biologistes ont détruit le système nerveux des animaux par divers traitements chimiques et thermiques, anéantissant jusqu'aux cellules souches qui, en temps normal, engendrent des neurones en continu. Les hydres restent alors quasi immobiles et ne s'alimentent plus spontanément, mais elles ne meurent pas tant que l'on introduit

de la nourriture dans leur bouche. Elles restent même capables de grandir et de se reproduire par bourgeonnement, comme l'ont montré des chercheurs japonais, qui les ont gardées en vie pendant plus d'un an.

L'équipe de Brigitte Galliot a analysé les molécules produites par les hydres privées de système nerveux. Elle a trouvé que les cellules dites épithéliales, situées dans l'épiderme (où elles forment l'équivalent de la peau) et le tube digestif, modifient l'expression de leurs gènes et prennent en partie le relais des neurones. Elles se mettent ainsi à fabriquer plusieurs types de

protéines impliquées dans des fonctions neuronales: molécules assurant la transmission d'information entre neurones, canaux ioniques impliqués dans l'émission d'influx nerveux, récepteurs membranaires sensibles à certains composés chimiques, etc.

Il reste à préciser les fonctions que cette modification de la lecture du programme génétique permet, mais les chercheurs pensent qu'elle rend les cellules plus sensibles aux modifications environnementales et plus susceptibles d'y répondre de façon appropriée.

G. J.

J. Wenger et al., Phil. Trans. R. Soc. B, vol. 371, 20150040, 2016



L'hydre d'eau douce est un animal aquatique long d'environ un centimètre (ici des spécimens de l'espèce *Hydra vulgaris*, dont le système nerveux est marqué par un colorant vert fluorescent).

Une autre origine de l'eau

Les comètes et les astéroïdes ne sont pas la seule origine possible de l'eau sur Terre. Les grains de poussière de la nébuleuse protosolaire qui se sont agglomérés pour former la Terre auraient pu adsorber de l'eau, qui serait très pauvre en deutérium (D), un isotope de l'hydrogène (H). Or Lydia Hallis, de l'université de Hawaï, et ses collègues ont mesuré le rapport D/H de la roche volcanique très ancienne de l'île de Baffin, dans l'Arctique canadien. Il est bien plus faible que celui des océans ou des astéroïdes, plus récents. Ainsi, l'eau viendrait en partie des grains de poussière.

Un trésor romain en Argovie

Cet été, Alfred Loosli, d'Ueken en Suisse, a remarqué plusieurs monnaies dans une taupinière au pied de ses pommiers. Il prévient le service d'archéologie du canton d'Argovie, qui y découvre plus de 4000 pièces romaines de bronze de haute qualité, puisqu'elles contiennent 5 % d'argent. Un expert y a identifié des monnaies des empereurs Aurélien, Tacite, Probus, Carin, Dioclétien et Maximien. Toutes datent d'après 274 et d'avant 294 de notre ère. L'habitude de cacher la fortune en Suisse ne date pas d'hier.

Un poisson télécommandé

déclencher la locomotion d'une larve de poisson-zèbre au repos et, à l'inverse, stopper son déplacement : c'est ce qu'a fait l'équipe de Claire Wyart, de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière, en activant, dans les deux cas, un même groupe de neurones sensoriels de la moelle épinière. L'animal étant transparent, les chercheurs ont agi par optogénétique : la lumière active une protéine photosensible dont on a inséré le gène dans les neurones. L'équipe a ainsi montré que ces neurones modulent la locomotion, et que cette modulation dépend de l'état de l'animal au moment de l'activation.

Génétique

Le riz a-t-il été domestiqué une fois... ou trois ?



Le riz sauvage (en haut) est arborescent et perd tôt ses grains. Pas le riz domestique (en bas).

Le riz est une affaire sérieuse : sans lui, l'Asie mourrait de faim. Après avoir séquencé le génome de 416 souches de riz

sauvage et plus de 1000 variétés cultivées, Bin Han, de l'Académie des sciences chinoise, défend depuis deux ans l'idée que le riz a été domestiqué une seule fois, il y a 8000 à 13 500 ans, dans le sud de la Chine. Or voilà qu'à partir des mêmes données, l'équipe de Terence Brown, de l'université de Manchester, affirme qu'il y aurait eu trois foyers de domestication distincts.

Les chercheurs ont repéré dans le génome du riz domestique des « signatures de domestication », c'est-à-dire les régions de moindre diversité génétique dues à la sélection de traits avantageux par les riziculteurs. Parmi elles se

trouvent par exemple les gènes qui font pousser droit la céréale ou qui l'empêchent de disperser ses grains trop tôt.

Ils ont ensuite défini deux composantes principales, c'est-à-dire deux combinaisons de signatures de domestication statistiquement indépendantes. Les nuages de points représentant les variétés de riz dans l'espace de ces composantes principales leur ont alors indiqué trois domestications distinctes : une en Chine du Sud (variétés de type japonica), une autre entre Brahmapoutre et Asie du Sud-Est (type indica) et une troisième au centre de l'Inde ou au Bangladesh (type aus). Bin Han a déjà annoncé une réponse critique.

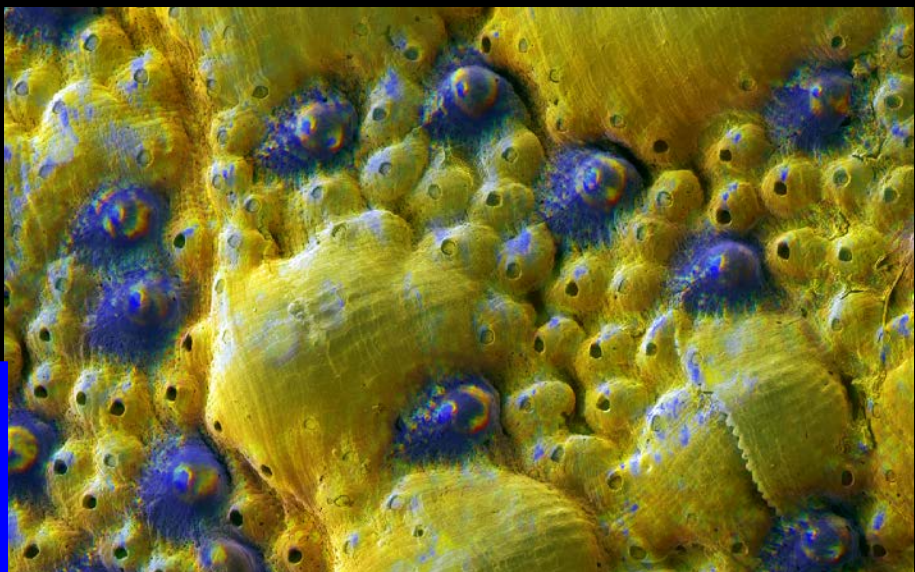
F. S.

Nature Plants, vol. 1, 15164, 2011.

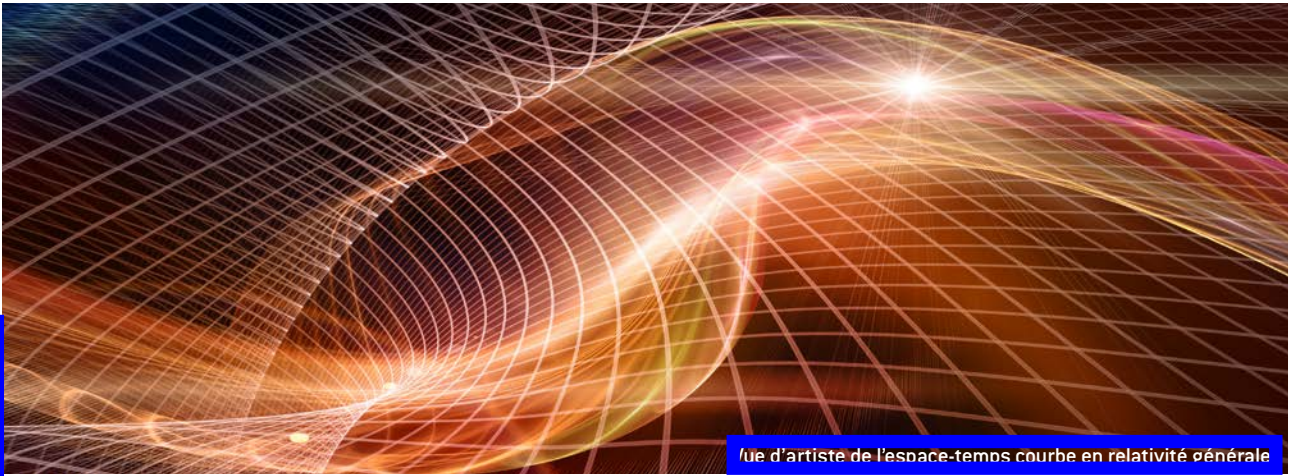
Insolite

Une carapace remplie d'yeux

Les chitons sont des mollusques marins dont la carapace est couverte de centaines d'ocelles (en bleu). La lentille de ces yeux élémentaires est constituée, comme la carapace, d'aragonite, un carbonate de calcium. L'équipe de Christine Ortiz, du MIT, a étudié les propriétés optiques et mécaniques des écailles et montré que ces dernières sont capables de former une image, grâce à laquelle l'animal peut voir un prédateur et anticiper une attaque.



Mathématiques



Vue d'artiste de l'espace-temps courbe en relativité générale

Solutions des équations d'Einstein : une conjecture démontrée

Une conjecture portant sur les conditions d'obtention de solutions des équations d'Einstein dépourvues de singularités vient d'être démontrée. Une avancée importante dans la compréhension mathématique de la relativité générale.

Nous fêtons, en 2015, le centenaire de la relativité générale. Cette théorie développée par Albert Einstein décrit la gravitation comme une conséquence de la déformation de l'espace-temps par la matière. Les équations sont complexes et difficiles à résoudre, notamment à cause de leur nature non linéaire. De nombreux aspects sont encore mal compris et restent intensivement étudiés par les mathématiciens et les physiciens. Les équations d'Einstein présentent une grande richesse même dans le vide, en l'absence de matière.

Lorsque les chercheurs étudient une certaine situation, ils veulent avant tout obtenir des solutions qui ont un sens physique et qui ne doivent donc pas présenter de singularité, c'est-à-dire qui ne doivent pas tendre vers l'infini en un point donné. Comment garantir cette propriété ? En 1999, Sergiu Klainerman, de l'université de Princeton, avait conjecturé l'existence d'une condition assurant qu'une solution des équations d'Einstein dans le vide ne présente pas

de singularité. Cette condition repose sur une quantité d'origine géométrique dont on peut vérifier facilement si elle est infinie, ce qui impliquerait la présence d'une singularité dans l'espace-temps. Avec Igor Rodnianski, de l'université de Princeton, et Jérémie Szeftel, du laboratoire Jacques-Louis Lions (CNRS et université Pierre-et-Marie-Curie), Sergiu Klainerman a récemment prouvé cette conjecture.

La recherche de solutions aux équations d'Einstein a pour cadre ce que les mathématiciens nomment un problème de Cauchy : quelles sont les solutions d'une équation aux dérivées partielles lorsque certaines conditions initiales sont données ? Dans le cas de l'équation classique des ondes, il suffit de définir des conditions initiales de position et de vitesse pour calculer une solution. Pour les équations d'Einstein dans le vide, le problème est beaucoup plus complexe, mais Sergiu Klainerman a proposé la conjecture suivante : les équations d'Einstein dans le vide admettent une solution si, à l'instant initial,

le tenseur de courbure est une fonction de carré intégrable.

Le tenseur de courbure est un objet mathématique qui mesure la courbure de l'espace-temps. Il peut, par exemple, décrire la façon dont deux géodésiques (la généralisation d'une ligne droite dans un espace courbe) initialement parallèles divergent. Le tenseur est une fonction des coordonnées d'espace-temps. La condition de Sergiu Klainerman consiste à « multiplier » le tenseur par lui-même et à l'intégrer sur l'espace-temps (plus précisément à intégrer le carré de la valeur absolue de la fonction). Si le résultat est fini, la fonction est dite de carré intégrable. Cette classe de fonctions, notée L^2 , donne son nom à la conjecture de Klainerman : la conjecture de courbure L^2 .

Après plus de dix ans d'efforts, Sergiu Klainerman, Igor Rodnianski et Jérémie Szeftel l'ont démontrée. La partie principale de la preuve – longue de près de 350 pages dans sa version complète – vient d'être publiée dans une revue de mathématiques, *Inventiones Mathematicae*.

Le théorème obtenu par ces trois auteurs montre que la norme L^2 (c'est-à-dire l'intégrale du carré) du tenseur de courbure est un objet fondamental qui contrôle la formation éventuelle de singularités. Ce résultat est important, car il apporte des éléments clés pour traquer des solutions pathologiques des équations d'Einstein.

De telles singularités ne sont pas physiquement acceptables, mais sont mathématiquement possibles. Le Britannique Roger Penrose avait énoncé une conjecture dite de censure cosmique selon laquelle les singularités (à l'exception de celle du Big Bang) sont toujours cachées (c'est-à-dire physiquement inaccessibles) derrière un horizon des événements, comme c'est le cas pour la singularité au centre d'un trou noir de Schwarzschild. Il n'existerait pas de processus conduisant à une singularité nue. Cette conjecture de censure cosmique reste cependant à prouver.

S. B.

S. Klainerman et al.,
Inventiones Mathematicae,
vol. 202(1), pp. 91-216, 2015

Archéologie

Le Pompéi salvadorien fouillé

Une équipe de Pavson Sheets, de l'université du Colorado, fouille actuellement Joya de Cerén, le « joyau de Cerén ». Vers 660 de notre ère, les activités de ce village maya du centre-ouest du Salvador ont été figées lorsque le volcan de San Salvador l'a brusquement recouvert d'une épaisse couche de cendres humides. La préservation des traces de vie quotidienne est si bonne que les chercheurs retrouvent des empreintes de doigts sur des bols ou de pied dans les jardins, que l'on reconnaît aux « ombres » laissées par les épis de maïs dans les murs de cendre. Ils ont ainsi mis au jour des toits de chaume, des couvertures, des jarres de haricots, des haches de jade, etc. La salle de l'un des bâtiments communautaires excavés était équipée de deux larges bancs, où les anciens du village se réunissaient peut-être afin d'y décider de la date de la récolte, de celles des fêtes et des rituels rituelles, etc. Toutefois, l'intérêt essentiel des résultats de la fouille est sociologique : de nombreux indices dessinent en filigrane les relations entre les familles paysannes, les anciens, les artisans, le shaman et les autres membres spécialisés de cette communauté paysanne.

F.S.

Latin American Antiquity, vol. 26(3), pp. 341-361, 2011



Dans cette partie de Cerén, on distingue au premier plan une grange, au fond le sauna communautaire, sur la gauche l'habitation d'une famille et sur la droite la cendre qui a enseveli le village.

Astrophysique

Une éruption solaire en 774

En 2012, une équipe de l'université de Nagoya a mesuré, dans des échantillons de cèdres japonais, un pic de concentration en carbone 14 (produit par le rayonnement cosmique) correspondant à l'année 774-775. L'origine de ce pic restait incertaine, mais une nouvelle analyse par Raimond Muscheler, de l'université de Lund, et ses collègues indique qu'il résulte d'une éruption solaire, la plus importante jamais enregistrée. Les chercheurs ont relié la composition isotopique des cèdres à celle de carottes de glace au Groenland et en Antarctique datant de la même époque. Ils en ont déduit qu'en 774 a eu lieu une éruption solaire cinq fois plus intense que toutes celles mesurées jusqu'à présent. Ces résultats permettent de réévaluer l'amplitude potentielle de ces événements. Si une telle éruption se produisait aujourd'hui, elle perturberait fortement le réseau de satellites, les systèmes de communications et de distribution d'électricité.

S.B.

Mekhaldi et al., *Nature Communications*, en ligne, 26 octobre 2011

Perception

Surdité liée au bruit : le rôle clé de la pejkavine

Une des causes les plus fréquentes de la perte d'audition est l'exposition au bruit. Mais l'impact de ce facteur environnemental dépend de façon cruciale d'un gène codant une protéine nommée pejkavine. C'est ce qui ressort des travaux d'un groupe de chercheurs dirigé par Christine Petit, de l'institut Pasteur à Paris, et Paul Avan, de l'université d'Auvergne.

En 2006, ces chercheurs avaient établi la responsabilité de ce gène dans une forme de surdité précoce touchant notamment certaines familles en Iran. Les individus portant des mutations de ce gène présentent des atteintes auditives variées. Et chez des souriceaux dont le gène de la pejkavine a été inactivé, les chercheurs ont constaté que les atteintes auditives variaient beaucoup d'un animal à l'autre.

En conséquence, ils se sont intéressés à l'environnement sonore des souriceaux, lesquels émettent des cris intenses au cours de leurs trois premières semaines de vie. Les chercheurs ont constaté que le niveau sonore à partir duquel ces animaux entendent augmentait avec le nombre de souriceaux dans la cage. Autrement dit, les souriceaux entendaient d'autant plus mal que leur environnement était bruyant.

Restait à déterminer le rôle de la pejkavine. L'examen des cellules auditives (les cellules sensorielles

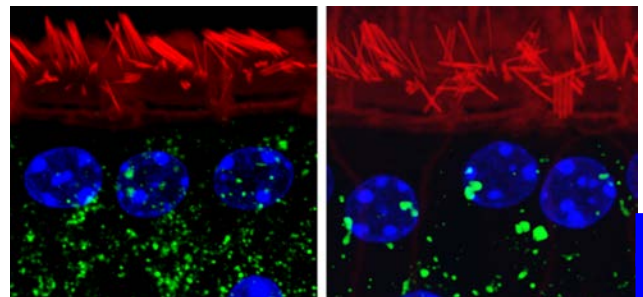
et les neurones auxquels elles sont connectées) des souriceaux a montré qu'en l'absence de pejkavine, ces cellules se dégradaient lorsque les animaux sont exposés à des sons même modérés (l'équivalent d'une minute de discothèque, chez l'homme). Et si l'exposition sonore se prolonge ou se répète, ces cellules meurent.

Pourquoi ? Christine Petit et ses collègues ont découvert que chez des souris normales, une exposition sonore conduit à une prolifération, au sein des cellules auditives, des peroxysomes - des organites qui, notamment, dégradent des composés toxiques de l'oxygène. En d'autres termes, il y a multiplication adaptative des peroxysomes en réaction au stress oxydatif dû à l'exposition au son. En l'absence de pejkavine, en revanche, cette réaction adaptative ne se produit pas ; les espèces réactives de l'oxygène se maintiennent à un taux très élevé, ce qui entraîne la mort des cellules.

Ces découvertes auront sans doute des conséquences sur le traitement de certaines surdités. On compense généralement les pertes auditives à l'aide d'appareils (prothèses auditives) qui amplifient les sons. Chez les personnes porteuses d'une mutation de ce gène, l'appareillage auditif risque d'être plus létal que bénéfique...

Maurice Mashaal

S. Delmaghani et al., *Cell*, vol. 163(4), pp. 894-906, 2015



Après une exposition sonore, les peroxysomes (en vert) prolifèrent dans les cellules auditives des souris normales (à gauche), mais dégénèrent chez les rongeurs dépourvus de pejkavine (à droite).

Biologie

De l'origine des myxozoaires

Les myxozoaires sont un groupe de parasites microscopiques qui infectent aussi bien des vertébrés que des invertébrés, et que les zoologistes ont bien du mal à placer dans l'arbre de la parenté du règne animal. Il en existe près de 2 000 espèces dont les spores contiennent au moins une capsule dotée de filaments pour se fixer à leur hôte. Ces capsules rappellent certains organites des cnidaires (corail, anémones de mer, méduses...), ce qui suggère un lien de parenté entre ces groupes.

Dorothee Huchon, de l'université de Tel-Aviv, et ses collègues ont comparé le génome et le transcriptome de deux myxozoaires, *Kudoa iwatani* et *Myxobolus cerebralis*, et d'un cnidaire, *Polypodium hydriiforme*, également un parasite. Leur analyse confirme que les myxozoaires ont leur place parmi les cnidaires.

S. B.

S. Chang et al., PNAS, en ligne, 16 novembre 2015.

Astrophysique

Du dioxygène sur Tchouri

La sonde Rosetta scrute la comète 67P/Tchourioumou-Guérassimenko, ou « Tchouri » depuis juillet 2014. Andre Bieler, de l'université du Michigan, et ses collègues ont mis en évidence de grandes quantités de dioxygène dans le nuage de gaz et de poussière qui nimbe Tchouri grâce au spectromètre de masse ROSINA de la sonde. Une découverte inattendue !

Les astrophysiciens ont étudié la composition de la chevelure de Tchouri, alimentée par les dégazages du noyau cométaire. Ils ont montré qu'elle est surtout composée d'eau (H₂O), de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone (CO₂). Ils ont aussi isolé de faibles quantités de composés sulfurés et de composés carbonés. La quantité de dioxygène représente environ 1 % de celle d'eau. Les chercheurs ne pensaient pas y trouver du dioxygène, ce qui pose la question de sa formation.

Différents processus ont été considérés, telle la photolyse, où un rayonnement ultraviolet briserait les molécules de la glace d'eau et formerait ainsi le dioxygène. Mais aucun scénario n'est pleinement satisfaisant. La question de l'origine de cette molécule sur Tchouri reste donc entière.

S. B.

A. Bieler et al., Nature, vol. 526, pp. 678-681, 2015.

Chimie

Molécules géantes antivirales

Les cellules dendritiques du système immunitaire sont dotées de récepteurs, nommés DC-SIGN, qui reconnaissent des sucres présents à la surface de divers pathogènes.

Lorsque des agents infectieux se fixent aux récepteurs, les cellules dendritiques mobilisent d'autres acteurs du système de défense de l'organisme. Certains virus (VIH, virus Ebola, virus de la dengue...) se lient à ces récepteurs et s'en servent pour infecter les cellules hôtes. Une stratégie pour les bloquer serait de concevoir des molécules qui se fixent à ces récepteurs plus fortement que les pathogènes. Jean-François Nierengarten, de l'université de Strasbourg et du CNRS, et ses collègues ont mis au point un procédé ultrarapide de synthèse de molécules adéquates.

Pour se lier plus fortement aux cellules que les pathogènes, les molécules doivent posséder plusieurs éléments, en général des sucres, qui vont se fixer simultanément au même récepteur (effet multivalent). Les dendritiques, des molécules ramifiées, présentent un grand nombre de sucres, mais leur synthèse, qui requiert de nombreuses étapes, est fastidieuse.

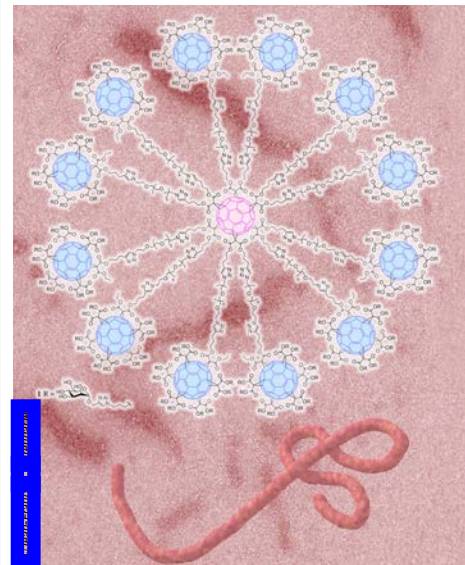
L'équipe de Jean-François Nierengarten a trouvé un moyen de synthétiser des molécules géantes portant 120 sucres en six étapes, au lieu d'une vingtaine par des méthodes classiques. Leurs molécules présentent un fullerène central – une molécule sphérique de

60 atomes de carbone – sur lequel sont fixées 12 branches. Sur chacune de ces branches est greffé un fullerène portant 10 sucres.

L'efficacité de ces molécules géantes pour inhiber l'action du virus Ebola a été testée *in vitro*. Elle serait supérieure de 33 % à celle d'antiviraux classiques. Ces molécules ne présentent aucune toxicité pour les cellules, mais il reste encore de nombreuses étapes avant des tests *in vivo*.

S. B.

A. Muñoz et al., Nature Chemistry, en ligne, 9 novembre 2015.



Cette molécule géante est formée de 13 fullerènes (bleu et rose) et de 120 sucres. Elle a une forte affinité avec le récepteur DC-SIGN qu'utilise le virus Ebola (en bas) pour s'introduire dans la cellule hôte.

Fin du Dévonien, sale temps pour les grands

L'ère du Dévonien s'est achevée il y a 359 millions d'années avec la disparition de 96 % des vertébrés. Si les plus grands animaux ont l'abord disparu, Lauren Sallan, de l'université de Pennsylvanie, et Andrew Galimberti, de Kalamazoo College, ont montré que durant les 36 millions d'années suivantes, les espèces survivantes ont subi une réduction de leur taille. En général, les animaux les plus grands vivent longtemps et se reproduisent moins, ce qui réduit les chances de s'adapter à un nouvel environnement.

Le double saut de la fourmi

La capacité de sauter est très rare chez les fourmis : six genres sur 326, dont trois utilisent leurs pattes et trois leur mâchoire. L'espèce *Odontomachus rixosus*, que l'on trouve en Asie du Sud-Est, est capable de bondir en arrière, en refermant rapidement ses grandes mandibules.

Contre l'objet ou l'animal qui la menace. Cependant, elle ne maîtrise guère le point d'atterrissage. Magdalena Sorger, de l'université d'État de Caroline du Nord, a découvert que ces fourmis sont aussi capables de se propulser avec leurs pattes et de viser un site précis. Des sauts à voir en vidéo : <http://bit.ly/nls459> fourmi.

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



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Pénurie d'antivenins en Afrique : un problème financier... et culturel

En Afrique, les morsures de serpent sont un problème de santé publique aggravé par le coût des traitements et la prégnance des pratiques coutumières.

Jean-Philippe CHIPPAUX

Chaque année dans le monde, 3 millions de morsures de serpent sont responsables de plus de 120 000 décès et autant d'invalidités. L'Asie, avec près des deux tiers des victimes, et l'Afrique, avec plus du quart, sont les plus touchées. Toujours chaque année, en Afrique subsaharienne, 800 000 patients envenimés par un serpent viennent en consultation dans un centre de santé, et les autorités sanitaires enregistrent 7 300 décès en moyenne. Toutefois, les services de santé sous-estiment l'incidence et la mortalité : les études communautaires montrent que moins de la moitié des morsures de serpent sont déclarées.

Le seul traitement médical éprouvé repose sur l'administration rapide d'un antivenin, un sérum composé d'anticorps fabriqués par des chevaux, que l'on a hyperimmunisés grâce à des injections répétées de venins. En septembre dernier, l'organisation non gouvernementale Médecins sans frontières (MSF) a dénoncé l'arrêt de la fabrication par le pharmacien Sanofi Pasteur du FAV-Afrique, l'un des principaux antivenins destinés à l'Afrique subsaharienne. Selon Sanofi Pasteur, la décision résulte de la chute drastique des ventes : alors que près de 200 000 doses étaient utilisées annuellement dans les années 1980, la vente était tombée à 30 000 unités au cours des années 2000, puis à 5 000 en 2010. L'objectif de MSF était

d'attirer l'attention sur un problème de santé publique bien identifié, mais négligé. Indépendamment de la disparition du marché d'un antivenin performant, cette alerte vise à susciter l'apport de ressources financières qui font cruellement défaut dans ce domaine de la santé publique et à inciter le laboratoire Sanofi Pasteur à transférer sa technologie à d'autres fabricants.

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), les antivenins doivent répondre à quatre critères essentiels : efficacité contre les espèces locales de serpents ; innocuité, afin qu'ils puissent être utilisés dans des dispensaires périphériques non médicalisés ; stabilité, en raison des conditions climatiques africaines ; enfin, accessibilité aux victimes, lesquelles sont généralement des paysans sans aide financière.

Les fabricants sont face à un dilemme : arrêter la production d'antivenins ou augmenter leur coût

Quelques fabricants se sont mobilisés au cours de la décennie écoulée pour proposer des antivenins respectant les rigoureuses contraintes et exigences de fabrication. Certains sont aussi efficaces et aussi bien tolérés que le FAV-Afrique, et offrent sur ce dernier un double avantage : ils sont trois fois moins chers et se présentent sous forme lyophilisée, ce qui autorise leur conservation

à température ambiante, alors que le FAV-Afrique, antivenin sous forme liquide, doit être conservé à 4 °C.

Pourtant, ces antivenins couvrent moins de 10 % des besoins estimés à 500 000 doses annuelles, en ne considérant que les patients des centres de santé de l'Afrique subsaharienne pour laquelle le FAV-Afrique était conçu.

La pénurie d'antivenins, surtout en Afrique, remonte aux années 1990, au cours desquelles ont été mis au point les anticorps hautement purifiés. Auparavant, les sérums antivenimeux étaient considérés comme dangereux, même si leur efficacité n'était pas contestée. Les techniques modernes de fabrication ont permis de réduire considérablement le risque d'effets indésirables. En particulier, les allergies et réactions anaphylactiques graves sont devenues excep-

tionnelles.

Cependant, les nouveaux procédés industriels ont notablement augmenté le coût des antivenins, ce qui a nourri le cercle vicieux de leur inaccessibilité : le prix dissuasif du produit a conduit à une chute drastique des commandes par les pharmacies et hôpitaux, entraînant une baisse de leur utilisation, ce qui a privé les personnels soignants d'un traitement essentiel et, par voie de conséquence, renforcé la défiance des patients à l'égard de la médecine occidentale.

Les fabricants se trouvent confrontés au dilemme d'arrêter la production ou d'augmenter le prix des antivenins. Il en résulte qu'un

traitement, lorsqu'il est disponible, dépasse en moyenne 200 euros, soit plusieurs mois de revenus d'une famille rurale.

Pour pallier cette alternative, les pays asiatiques et sud-américains se sont organisés en développant des productions locales d'antivenins, fortement subventionnées par les États, parfois au détriment de la tolérance. En revanche, l'Afrique n'a pas été en mesure de suivre cet exemple et reste soumise à des fabricants extérieurs qui abandonnent ces produits lorsqu'ils deviennent peu rentables, comme l'entreprise pharmaceutique allemande Behringwerke il y a 20 ans et comme Sanofi Pasteur aujourd'hui.

Mais il est d'autres causes, plus profondes, à la dynamique de ce cercle vicieux. En Afrique, dans l'esprit de la plupart des victimes, la morsure résulte d'une fatalité ou d'une punition, et non d'une rencontre naturelle ou accidentelle avec un serpent. Une telle rencontre s'explique par le comportement du serpent, animal dont les milieux favorables incluent ceux dédiés aux activités agricoles. Le patient consulte donc en priorité – et souvent exclusivement – un thérapeute traditionnel pour conjurer le maléfice, ce qui retarde le traitement médical. Dès lors, une majorité de la population, plus soucieuse de son salut spirituel que de sa santé physique, ne considère pas les antivenins comme pertinents.

En outre, depuis des décennies, les personnels de santé ne bénéficient plus de formation à la prise en charge des morsures de serpent. Cette situation est sans conséquence dans les pays tempérés, où l'incidence est faible et le recours à des traitements palliatifs possible. Mais elle est inacceptable dans les pays tropicaux où les envenimations représentent l'une des dix premières causes de consultation dans les hôpitaux, aux ressources thérapeutiques restreintes.

La Société africaine de venimologie, créée en 2012, développe une stratégie pour améliorer la prise en charge des morsures de serpent et rendre accessible le seul traitement efficace contre les envenimations. Cette stratégie repose sur trois axes. Le premier consiste à mener des études épidémiologiques s'appuyant sur la notification



DES SERPENTS VENIMEUX D'AFRIQUE, le vipéridé *Echis ocellatus* est parmi les plus redoutables. Endémique d'Afrique de l'Ouest, ce reptile long d'une cinquantaine de centimètres, vivant dans les savanes et les déserts, tue plus de personnes que tous les autres serpents de la région.

L'AUTEUR



Jean-Philippe CHIPPAUX, médecin et docteur en santé publique, est directeur de recherche à l'IRD.

Institut de recherche pour le développement). Il est président d'honneur de la Société africaine de venimologie.

BIBLIOGRAPHIE

J.-Ph. Chippaux, *Les Serpents d'Afrique occidentale et centrale*. IRD Éditions. 2006.

J.-Ph. Chippaux, *Venins de serpent et envenimations*, IRD Éditions. 2002.

obligatoire des morsures de serpent et sur les enquêtes communautaires (puisque la moitié des victimes ne consultent pas dans un centre de santé), afin d'identifier les besoins en antivenins.

Un deuxième axe porte sur la formation du personnel médical au diagnostic et au traitement de l'envenimation, afin d'améliorer le pronostic et réduire les complications. Cette formation inclura les praticiens traditionnels, qui favoriseront une consultation médicale plus précoce tout en rassurant le patient.

Un troisième axe, enfin, est d'œuvrer à la répartition équitable du coût élevé du traitement entre tous les acteurs (État, collectivités locales, entreprises privées – notamment agricoles –, assurance maladie), comme cela existe déjà dans quelques pays.

Faute d'envisager l'ensemble des facteurs responsables de la pénurie des antivenins, les morsures de serpent resteront une maladie négligée touchant les populations vulnérables des pays en développement et, comme le soulignait MSF, absente des préoccupations de leurs autorités politiques.



Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

Financement de la recherche : « L'ANR ne fait pas bouillonner les idées comme elle le devrait »

L'Agence nationale de la recherche, un acteur majeur du financement de la science française, fait l'objet de nombreuses critiques. L'astrophysicien Patrick Petitjean présente des pistes de réflexion pour améliorer ce système.



Patrick PETITJEAN est astrophysicien (UPMC et CNRS) et a présidé un comité scientifique de l'ANR pendant trois ans.

Une partie du financement des laboratoires français provient des appels à projets, qu'organisent l'Agence nationale de la recherche (ANR). De nombreux reproches ont été formulés à l'encontre de cette dernière. Les chercheurs investissent beaucoup de temps pour répondre aux appels à projets, mais très peu de ces propositions sont retenues, ce qui entraîne une grande frustration. Patrick Petitjean, chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris (université Pierre et Marie Curie et CNRS), a présidé pendant trois ans le comité scientifique « Physique subatomique, science de l'Univers, structure et histoire de la Terre » de l'ANR. Selon lui, cette agence manque à ses objectifs, bien qu'il soit possible d'améliorer la situation.

POUR LA SCIENCE

Vous avez annoncé en septembre dernier que vous vous désolidarisez de toute activité de l'ANR. Quelles en sont les raisons ?

PATRICK PETITJEAN : La tâche des membres d'un comité scientifique de l'Agence nationale de la recherche est d'évaluer les projets soumis par les chercheurs en réponse à l'appel d'offres de l'agence. Pour ma discipline, cela représente

environ une centaine de dossiers par an. Nous devons ensuite établir un classement de ces projets par ordre de priorité. Cette liste est alors envoyée à l'ANR, qui décide du nombre de projets qui seront effectivement financés. En 2015, c'est moins d'un dossier sur dix qui a été financé dans ma section. Avec un taux aussi faible, l'ANR ne joue pas son rôle. Nous avons été nombreux à faire remonter nos doléances à l'ANR, sans avoir été écoutés. J'ai donc annoncé que je ne participerais plus aux activités de cette agence.

PLS

N'est-ce pas la baisse globale des budgets alloués à la recherche qui crée cette situation ?

P.P. : Je ne veux pas entrer dans un débat de chiffres, car il est très difficile d'avoir une bonne vue d'ensemble. L'une des raisons est que la recherche en France est très diversifiée et que les besoins en sciences humaines ne sont pas les mêmes que ceux en mathématiques ou en astrophysique. Les besoins d'investissements varient d'un domaine à l'autre. Par exemple, le coût d'un détecteur (en biologie, en physique, etc.) n'a rien à voir avec le salaire de postdoctorants.

Il faut ajouter à cela que les laboratoires français sont financés par différents canaux. Il y a une dizaine

d'années, les financements récurrents, c'est-à-dire la dotation annuelle attribuée à chaque laboratoire, étaient quasiment la seule source du budget des laboratoires. Mais ils ont baissé depuis dix ans de façon colossale. À l'époque, un autre mode de financement a été mis en place, où des crédits sont affectés à des projets à la suite d'appels d'offres. L'ANR, créée en 2005, pilote chaque année un tel appel à projets. Mais il en existe d'autres.

Ces financements sur projets ont d'abord été conçus pour soutenir le financement récurrent. Ils permettaient certaines choses que ne permet pas le financement récurrent : recruter des postdoctorants (des contrats de jeunes chercheurs à durée limitée), encourager des collaborations entre différents laboratoires, etc. Ces appels à projets devaient ainsi créer une émulation et soutenir les projets innovants. À mon sens, l'ANR devrait faire bouillonner les idées, faire des paris, prendre les risques. Je pense que nombre de chercheurs voient aussi d'un œil positif cette démarche.

PLS

Pourtant, l'ANR est assez critiquée..

P.P. : Oui, pour plusieurs raisons. Pour beaucoup de mes collègues, le problème principal est la baisse globale du financement de la recherche. Les crédits alloués par l'ANR en pâtissent et le



nombre de projets financés diminue. Et le temps important que passent les chercheurs à rédiger les dossiers qui ont peu de chance d'être retenus crée beaucoup de frustration.

Ma position est un peu atypique. Oui, il y a un manque de crédits ; cependant, ce n'est pas le seul problème. Je suis convaincu que l'on peut améliorer le fonctionnement de l'ANR et limiter la frustration produite par ces appels à projets.

PLS

Vous critiquez le fait que le taux de projets retenus est d'environ 10 % cette année. Ce taux est-il trop bas ?

P.P. : C'est bien là le problème. Je crois que les chercheurs acceptent tout à fait le processus de sélection. Ils ont bien conscience que l'on ne peut pas financer tous les projets. En revanche, quand l'ANR ne retient que 10 % des projets, quel message renvoie-t-elle aux chercheurs ? Que seuls 10 % des projets méritent d'être financés ? Ce n'est bien sûr pas le cas. Nous recevons bien plus d'excellents projets. Certes, il faut faire un choix, mais avec 10 %, nous atteignons un niveau si faible que la sélection en devient presque arbitraire et subjective. Cela laisse de nombreux autres projets tout aussi excellents sur le carreau. Et nous n'avons pas d'arguments valables pour leur expliquer le refus de leur dossier. Un taux de 20 à 30 % de réussite serait bien plus raisonnable. On arriverait alors à séparer les dossiers excellents des dossiers très bons. Et je pense que les chercheurs comprendraient que ce niveau serait acceptable. Ils n'auraient pas l'impression de rédiger et soumettre des dossiers pour rien.

PLS

Comment améliorer la situation ?

P.P. : Même à budget constant, il serait possible d'augmenter le nombre de projets financés par l'ANR. Par exemple, quand un projet comporte une demande de postdoctorants pour un équivalent de huit années de contrat, le comité pourrait décider de modifier ce projet, considérer que quatre années suffisent et qu'il peut ainsi attribuer les quatre années restantes à un autre projet. Aujourd'hui, l'ANR ne nous permet pas de faire ce genre de choses ; pourtant, on pourrait ainsi financer deux projets au lieu d'un seul, ce qui permettrait d'atteindre un niveau de 20 % des projets soutenus par l'ANR.

PLS

Pourquoi l'ANR est-elle réticente ?

P.P. : Cette démarche serait soi-disant du saupoudrage et cela dévaloriserait les projets amputés d'une part de leur dotation. L'idée, pour l'ANR, est de financer au maximum les quelques projets retenus pour viser l'excellence. Je ne suis pas d'accord. Avec quatre ans de postdocs au lieu de huit, un projet, s'il est scientifiquement excellent, restera et l'équipe fera du bon travail.

Cela pourrait être facilement mis en place si l'ANR donnait à chaque comité scientifique une enveloppe contenant, par exemple un nombre fixé d'années de postdocs à attribuer. Nous pourrions moduler les demandes entre différents projets à partir de critères scientifiques. Mais il y a un manque de confiance envers les comités et on

est dans cette situation où l'on nous demande uniquement de classer les projets, et rien de plus.

Par exemple, l'année passée, j'étais président d'un comité scientifique. J'ai demandé la possibilité de diminuer la dotation des projets car parfois, certains budgets sont surestimés ou les choix plus économes peuvent être suggérés. Nous avons une responsabilité à éviter le gaspillage et aussi à engager des frais de façon

Même à budget constant, il serait possible d'augmenter le nombre de projets financés

raisonnée. Je pensais également que si, disons sur dix projets, je récupérais à chaque fois 10 %, je pouvais faire passer un 11^e projet. Bien sûr, je me leurrais sur ce point.

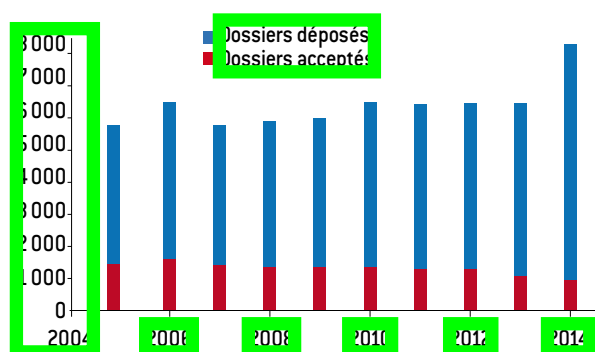
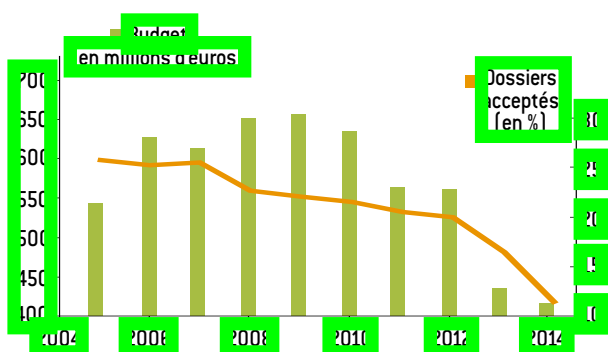
C'est paradoxal : la baisse du budget justifie un taux de projets acceptés aussi bas, mais l'ANR ne nous incite pas pour autant à faire des économies. Et ce n'est pas la seule contradiction.

PLS

Une autre situation paradoxale est celle des projets originaux. L'ANR encourage les comités à sélectionner des dossiers originaux, mais n'est-il pas difficile de prendre ce risque étant donné le faible nombre de projets retenus ?

P.P. : Ce qui nous intéresse, en tant que chercheurs, c'est la science. Et nous sommes forcément séduits par les idées nouvelles, les projets qui prennent

L'ANR EN QUELQUES CHIFFRES



L'Agence nationale de la recherche a été créée en 2005 et il est possible de suivre son évolution grâce à ses rapports d'activité annuelle. Le point le plus discuté est souvent le budget de l'agence alloué aux projets (en vert), qui a augmenté jusqu'en 2009 pour atteindre 650 millions d'euros. Depuis, il a fortement diminué.

Cette baisse se retrouve dans le taux de dossiers acceptés par rapport aux dossiers déposés (courbe orange) qui passe d'environ 25 % en 2005 à 10 % en 2014. Pour être complet, il faut regarder le nombre

de dossiers déposés et acceptés (en bleu et en rouge). Le nombre de demandes a régulièrement augmenté. En 2014, l'affluence exceptionnelle s'explique par un allègement de la procédure de sélection des dossiers avec un premier tour qui requiert seulement de rédiger une demande de cinq pages. Cependant, ce pic ne suffit pas à expliquer le taux d'acceptation très bas de 2014. En effet, le nombre de dossiers acceptés en 2014 est inférieur à celui de 2013. Le taux d'acceptation aurait donc été faible même avec un nombre constant de demandes.

les risques. C'est comme ça que la science a fait ses progrès les plus importants, en sortant des sentiers battus. L'ANR nous encourage à sélectionner des projets innovants et c'est bien dans ses prérogatives. Mais quand le taux de projets retenus est de 10 %, il est difficile de choisir des projets à risque. Surtout que, à côté, on a des projets solides, que la communauté attend, qui sont essentiels. Il est difficile d'écarter ces projets au profit de paris sans garantie. On devrait, mais c'est difficile à justifier. Avec une pression de sélection aussi forte, on se retrouve dans une situation impossible. À mon sens, l'ANR ne fait pas bouillonner les idées comme elle le devrait.

PLS

Outre le faible taux de projets retenus, un autre reproche formulé à l'encontre de l'ANR est l'aspect chronophage des dossiers à rédiger. Quelque chose a-t-il été fait ?

P.P. : Effectivement, les chercheurs passent beaucoup de temps à constituer des dossiers et des demandes de financement. C'est l'inconvénient d'avoir un grand nombre de sources possibles de financement, à chacune correspondant une faible chance d'obtenir des sous-

Les chercheurs sont obligés de postuler tous azimuts. Il est difficile d'estimer le temps que l'on met pour écrire un tel dossier. Mais pour un jeune chercheur, qui part de zéro, c'est peut-être un mois de travail. Évidemment, on peut ensuite réutiliser ce dossier pour les autres demandes, mais chaque agence ayant des requêtes particulières, il faut adapter son dossier. Cela prend donc beaucoup de temps, même pour un chercheur expérimenté. D'où la frustration des chercheurs qui peaufinent des dossiers dont la probabilité d'être retenus est ridiculement faible.

L'ANR semble avoir pris en considération ce problème. Le processus a été décomposé en deux étapes. Dans un premier temps, les chercheurs envoient des dossiers de cinq pages. Environ 30 % des projets sont sélectionnés et les chercheurs sont alors invités à rédiger des rapports détaillés de trente à quarante pages. Le hic est la façon dont les projets sont sélectionnés à la première étape : ils sont envoyés à des spécialistes qui notent les projets, puis l'ANR classe ces dossiers et ne sélectionne que les mieux notés, sans considérer le fait que certains rapporteurs peuvent noter plus ou moins sévèrement.

Nous avons signalé ce problème et un système très compliqué de repêchage de certaines notes a été mis en place pour corriger ces biais. Mais cela s'est révélé lourd, absurde et peu efficace. Alors qu'un système de normalisation des notes, comme cela se fait très bien dans d'autres domaines, aurait parfaitement fonctionné.

PLS

Enfin, y a-t-il au sein de l'agence une volonté d'améliorer le système ?

P.P. : Lors de mes trois années de participation au comité scientifique de l'ANR, mes collègues et moi avons souvent fait remonter nos remarques, mais sans suite. Il y a certainement des gens de bonne volonté à l'ANR, des personnes qui aimeraient que les chercheurs ne se sentent pas floués par le système d'appels à projets. L'ANR pourrait être un bon dispositif qui crée une émulation et dynamise la recherche française. Il y a pourtant des blocages qu'il est difficile de comprendre. Et c'est toute la recherche française qui en souffre.

Propos recueillis par Sean BAILL

Aux origines des trolls

Sur le Web, les trolls, terme qui désigne les commentaires ou auteurs agressifs et stériles, sont légion. Mais ce phénomène spécifique au monde virtuel a peut-être une explication.



Quand nous lisons, parmi les commentaires d'un article d'un journal en ligne, des phrases telles que : « Vous parlez encore d'un sujet que vous ne maîtrisez pas », « vous savez pertinemment que vos arguments sont minables alors vous vous défendez de manière minable », « Fais un procès à tes parents je n'y peux rien si t'es autant limité », etc., nous pouvons regretter, comme l'écrivain italien Giuseppe Tomasi di Lampedusa, qu'une conversation puisse « ne pas ressembler à une querelle de chiens ». Une fois la stupeur et l'indignation passées, nous pouvons aussi nous demander quelle est l'origine de cette grossièreté.

Pour le comprendre, il est utile de distinguer deux formes de conversation : la conversation privée, qui se déroule au comptoir d'un bistro ou au cours d'un déjeuner en famille, et la conversation publique – la *disputatio* universitaire, le débat politique... – qui comprend non seulement des conversants, mais aussi un public. La conversation publique obéit à certaines règles : on doit y éviter le mensonge, l'attaque *ad personam*, l'argument d'autorité, l'invocation de son intime conviction, le procès d'intention... Ces règles ne sont pas uniquement des règles de politesse : comme les règles de construction du discours scientifique, ce sont des conditions qui permettent à la conversation de progresser et au public de ne pas perdre son temps. La conversation privée, qui porte moins à conséquence, ne suit pas forcément ces règles – au pire, seuls les protagonistes y perdent leur temps – et tous les coups y sont hélas permis.

Outre le fait qu'ils sont à l'abri derrière leur clavier et souvent anonymes, peut-être les auteurs de commentaires d'articles en ligne, de blogs, de forums ou de microblogs s'autorisent-ils peut-être à être grossiers et primaires parce qu'ils appliquent, à la conversation publique, les règles de la conversation privée. Et qu'ils le fassent n'est pas si surprenant : la conversation privée est pratiquée par tout le monde, alors que, jusqu'à la fin du XX^e siècle, la conversation publique était

Nous pouvons imaginer que la pratique de la conversation publique suffise à en apprendre peu à peu les règles – qu'à force d'entendre d'autres intervenants dire : « Je me suis mal fait comprendre » plutôt que : « Tu es bouché à l'émeri », tout le monde finira par comprendre que, par exemple, insulter son interlocuteur ne fait pas progresser la conversation. Chacun peut d'ailleurs contribuer à la diffusion des règles de la conversation publique. Par exemple, quand une personne

lol, la phrase est pas complètement stupide mais votre certitude l'est



Rédigé par : [silvia](#) | les 18 octobre 2018 à 22 h 06 min | [Répondre](#) [Signaler un abus](#) |

LE COMMENTAIRE D'UN TROLL tel qu'on en trouve sur le site du journal *Le Monde*

réservée à un petit nombre de personnes, qui en apprenaient tant bien que mal – et parfois imparfaitement – les règles sur le tas. Avec le Web 2.0, elle est subitement devenue accessible à toutes et tous. Il n'est donc pas surprenant que ces « hordes de barbares » qui ont envahi l'espace à peu près policé de la conversation publique, y appliquent les seules règles qu'ils connaissent : celles de la conversation privée.

Si telle est la raison de la grossièreté qui se déverse sur le Web, nous devons donc la voir comme un effet secondaire malheureux d'un phénomène en lui-même heureux : l'ouverture à tous de la conversation publique, que les techniques de communication limitaient naguère à quelques privilégiés.

commente les messages d'un article en ligne en s'indignant qu'« un certain nombre de commentaires [lui] paraissent à la limite du mépris et de l'insulte », elle contribue à cet apprentissage.

Mais on peut aussi penser que, maintenant que la conversation publique est accessible à tous, la maîtrise de ses règles devrait être l'un des objectifs majeurs de l'apprentissage de la langue. Aujourd'hui, il est sans doute aussi important d'apprendre à converser publiquement que d'apprendre à composer une dissertation ou un commentaire.

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



■ POUR LA
SCIENCE

Le magazine mensuel
Pour la Science (12 n^{os}/an)

4[€],90 /mois
seulement
ou 59[€] pour 1 an

VOS AVANTAGES ABONNÉ

- ✓ **24 % 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

■ POUR LA
SCIENCE

■ MA FORMULE

☐ **OUI**, je m'abonne à l'Offre Découverte à 4.90 € par mois ou 59 € pour 1 an.
Je reçois 12 numéros par an du magazine *Pour la Science* (12 n°/an)

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

24%
de réduction

! ■ MES COORDONNEES

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays : Tel :

B. MON MODE DE REGLEMENT

☐ Je règle par prélèvement **4.90 € par mois**. Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC. (DECPV)

AUTORISATION DE PRELEVEMENT

En signant ce mandat SEPA, j'autorise pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement des réception de mon bulletin et bénéficie d'un 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

3 - DATE ET SIGNATURE OBLIGATOIRES

À _____

Date / /

Signature :

2 - COORDONNÉES BANCAIRES

COORDONNEES BANCAIRES

[illegible]

SIC		une de paie	ent	Paiement récurrent/répétit
-----	--	-------------	-----	----------------------------

© 2006 The Authors
Journal compilation © 2006 Blackwell Publishing Ltd

☐ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 59 €**. (DEC1A)

Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter. Europe 12€ – autres pays 25€

☐ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science* ☐ Par carte bancaire N°

					Date d'expiration	/ /
--	--	--	--	--	-------------------	-----

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'examen de vos données personnelles par nos services et/ou être communiquées à nos partenaires. Elles peuvent également être transmises à nos partenaires afin qu'ils puissent vous proposer des services personnalisés. Si vous ne souhaitez pas que vos données soient traitées de cette manière, vous pouvez cocher la case ci-dessous.

NOM DU CRÉANCIER ICS N° FR92ZZZ42690

Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

N° de référence unique de mandat (RUM)

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 ☐



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

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

- :: Le profil des femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- :: Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- :: Des reportages réguliers sur le thème »Women in Science«

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

POUR LA
SCIENCE

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

www.academia-net.org

CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES par Gérald Brunner

Mensonges privés, vérités publiques

À l'heure d'Internet et des mégadonnées, votre curiosité mal placée se dévoile sur la place publique.

Quel est le point commun entre Nabilla Benattia, Julie Gayet et Dieudonné M'Bala M'Bala ? La première idée qui viendra aux lecteurs de ces lignes est qu'ils ont, chacun à leur manière, défrayé la chronique. C'est vrai, mais ces trois individus sont aussi des personnalités dont le nom a suscité le plus de recherches sur Google en France durant l'année 2014.

Ainsi, à la question : « Qu'avons-nous fait en 2014 de cet outil fabuleux qui nous permet d'avoir accès à une immense partie de la connaissance humaine ? », la réponse dévoilée par l'agrégation de nos requêtes collectives est : « Nous sommes allés chercher des informations concernant la maîtresse du président de la République, un humoriste sulfureux et une starlette de la télé-réalité. »

Ces recherches effectuées sur Google trahissent, de façon amusante mais pas vraiment élogieuse, ce qui aiguise la curiosité des foules. Ce résultat est d'autant plus représentatif pour la France que 90 % des requêtes sur Internet y sont effectuées avec ce moteur de recherche. On se rappelle que cette année-là (2014), notre pays a pourtant eu l'honneur de l'attribution de deux prix Nobel, celui de littérature et celui d'économie entre les personnes de Patrick Modiano et Jean Tirole. L'intérêt suscité par les lauréats de ces prestigieux prix est-il comparable, même de loin, à celui de notre tiercé gagnant ?

Les outils proposés par Google permettent d'effectuer une telle comparaison. Les chiffres montrent, comme on pouvait s'y attendre, que le prestige du prix Nobel n'a

pas pesé bien lourd dans les mécanismes de la curiosité collective.

On pourrait avancer que les médias conventionnels influencent les individus et orientent leur curiosité sur certains thèmes ou personnalités. Hélas pour ces plaidoiries, les mégadonnées, ou *big data*, sont des outils de dévoilement très puissants de notre médiocrité commune.

Ainsi, pour ne prendre que l'exemple de l'intérêt qu'a suscité Julie Gayet, il faut se



À PROPOS DE QUELLE PERSONNALITÉ vous êtes-vous renseigné avec le moteur de recherche de Google en 2014 ? Patrick Modiano, prix Nobel de littérature, ou Julie Gayet, première dame non officielle ?

souvenir qu'à peine l'affaire dévoilée par un tabloïd, les internautes s'étaient rués sur leurs ordinateurs pour en savoir plus sur la première dame « non officielle », avant même que l'ensemble de la presse n'en parle. On ne peut donc pas accuser la grande presse d'avoir contribué en premier à la vague d'intérêt pour cette personne. Les traces laissées par les internautes sur la Toile, parce qu'elles peuvent être datées, en attestent.

Cette forme de curiosité semble donc très répandue, et pourtant nous n'en faisons pas facilement la confession publique. Nous nous imaginons souvent avoir des appétits plus nobles que ceux qui nous animent en réalité.

Pour n'en prendre qu'un exemple, les économistes Katherine Milkman, Todd Rogers et Max Bazerman, de l'université Harvard, se sont livrés en 2009 à une intéressante comparaison entre les souhaits émis par des utilisateurs d'un site internet de location de films et ce qu'ils regardaient réellement. Leurs souhaits s'orientaient vers des films d'auteur, des documentaires, des productions assez exigeantes, mais en réalité, ils louaient plutôt des fictions grand public et populaires.

Ainsi, vous ne trouverez pas facilement, parmi vos amis, des gens qui admettent s'intéresser plus à la vie privée d'un homme politique qu'à son programme. Ou encore, si on se fiait à ce que les gens déclarent préférer à la télévision pour mesurer l'audimat, Arte viendrait peut-être avant TF1 !

Tout cela ne revêt pas de caractère de gravité bien entendu, mais n'est pas non plus aussi insignifiant qu'il y paraît. Il s'agit en effet d'une inversion de la classique maxime de philosophie politique : « Vérité privée, mensonge public », qui devient, par la puissance de la transparence des données collectives et notre répugnance à reconnaître la médiocrité de nos préférences : « Mensonge privé, vérité publique ».

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

Tous les papiers se recyclent,
alors trions-les tous.

**C'est aussi
simple à faire
qu'à lire.**

La presse écrite s'engage pour le recyclage
des papiers avec Ecofolio



Moins de fèces, moins de phosphore

par Jean-Louis Hartenberger, Sur le blog Histoires de mammifères

Depuis 10 000 ans, l'explosion démographique humaine a provoqué la quasi-éradication de la plupart des « grands mammifères » terrestres sur tous les continents. Au total, il y a eu près de 150 espèces (mammouth, mastodon, paresseux et castors géants, smilodon, etc.) qui ont disparu. Plus récemment, cette vague d'extinctions a frappé les mammifères marins : la baleine bleue a vu ses effectifs divisés par 100 en quelques décennies, au point qu'elle est au bord de l'extinction malgré l'interdiction de sa chasse.

Tous les éléments chimiques présents dans les excréments, le phosphore est un élément clé. C'est un constituant majeur de la structure de l'ADN et un acteur crucial de la respiration, du métabolisme cellulaire ou de la photosynthèse.

Hormis les éléments d'origine minérale, une large part des transferts en éléments nutritifs est assurée par les organismes vivants eux-mêmes. Les mammifères marins rejettent dans leurs fèces de nombreux déchets azotés. Leur transfert vers le continent est assuré par les oiseaux de mer et les poissons migrateurs.

Ils ont été divisés environ par 1 000 depuis 20 000 à 30 000 ans. Enfin, les transferts par les oiseaux de mer et les poissons migrateurs ont diminué de 96 %.

Mais les animaux d'élevage ne jouent pas aujourd'hui le même rôle que les bœufs sauvages autrefois, d'autant que leur biomasse est plus élevée ? C'est peu probable. D'une part, la plupart des élevages industriels sont confinés par des clôtures ou dans les étables. D'autre part, les individus d'un troupeau ont une alimentation similaire et se nourrissent et défèquent tous dans les mêmes lieux. Ainsi, les flux d'engrais sont très contrôlés, ce qui fait obstacle à leur diffusion dans les écosystèmes.

Le cas du phosphore est particulièrement intéressant. Les ressources en phosphore minéral sont limitées : les spécialistes estiment les réserves mondiales à 50 ans d'exploitation. Comment dès lors assurer la productivité de l'agriculture moderne si l'on est privé du recyclage par les organismes vivants ? Par ailleurs, le phosphore est aujourd'hui très mal réparti dans les sols. Dans certaines régions, les concentrations élevées entraînent de l'eutrophisation (comme les algues vertes sur les côtes bretonnes), alors que dans d'autres régions, il fait défaut. Ne faudrait-il pas envisager sa redistribution en mettant à profit des agents naturels qui peuvent le stocker et le répartir naturellement dans les écosystèmes, à savoir les mammifères ? Comme il a été dit il y a longtemps, labourage et pâturage sont deux mamelles...



Le rôle des excréments des grands mammifères dans le cycle du phosphore est important

En 1968. Pour les cachalots, l'avenir est presque aussi sombre.

Les ressorts de l'extinction des grands mammifères ont été largement débattus, mais peu d'études ont été consacrées à son impact écologique. Des biogéochimistes des universités d'Oxford, Cambridge et Princeton se sont penchés sur cette question, en se concentrant sur l'évolution des transferts d'éléments nutritifs, et notamment du phosphore (<http://bit.ly/pls459> scilogs).

La digestion par les mammifères accélère le recyclage des éléments nutritifs. En particulier, la matière végétale est scindée en éléments facilement décomposables, et les déjections constituent un engrais naturel azoté qui profite à tout l'écosystème. Parmi

les poissons, saumon, anguilles, etc.). Sur terre, le recyclage est assuré par les herbivores, dont les excréments enrichissent les sols et nourrissent les végétaux.

Christopher Doughty et ses collègues ont d'abord estimé les quantités d'excréments produits par les grands mammifères avant leur extinction et aujourd'hui. Ils ont ensuite quantifié les concentrations en phosphore de ces engrais naturels. Leur conclusion est que la masse de phosphore disponible grâce aux déjections des cétacés, qui approchait autrefois 340 000 tonnes par an, a diminué de 77 % depuis le début de la grande pêche baleinière il y a environ trois siècles. De même, les apports en phosphore dans les sols dus aux grands mammifères terrestres auraient



Jean-Louis HARTENBERGER, paléontologue spécialiste des mammifères, est l'auteur du blog Histoires de mammifères www.scilogs.fr/histoires-de-mammiferes/



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

3^{ÈME} ÉDITION

UNIVERS CONVERGENTS

SCIENCES - FICTIONS - SOCIÉTÉ

Le Ciné Club de l'Institut Henri Poincaré

Au Cinéma Grand Action,
5 rue des Écoles, Paris 5.

TOUS LES DERNIERS
MARDIS DU MOIS - 19^H30

En présence de Cédric Villani, Jean-Philippe Uzan
et de nombreux intervenants.

> 26 JANVIER - *Beautiful mind*

En mathématiques, le mythe du génie est-il toujours d'actualité ?

> 16 FÉVRIER* - *The time machine*

Le temps est-il une dimension comme les autres ?

> 29 MARS - *Frankenstein*

L'éthique est-elle la seule limite à la recherche scientifique ?

> 26 AVRIL - *Moonwalk one*

Comment a-t-on réalisé le « grand pas pour l'humanité » ?

> 31 MAI - *Contact*

Quelle limite entre science et croyance ?

> 28 JUIN - *La grotte des rêves perdus*

Qu'apporte la science à l'histoire et à l'art ?

> Entrée libre sur réservation
15 jours avant chaque séance
www.ihp.fr/fr/cine-club-2016

En partenariat avec



Les neurosciences ont ouvert de multiples fenêtres sur le rêve, qui occupe plus du quart de notre vie. En dévoilant ce qu'il contient, elles révèlent peu à peu à quoi il sert.



Pourquoi rêvons-nous ?

Sabell Arnul

A première vue, les rêves ressemblent à un foisonnement hétéroclite d'événements aux lois insolites, à la construction déordonnée, aux quêtes inattendues. Ils sont emplis d'images, de sons, d'odeurs, de goûts, de sensations tactiles et d'émotions. Souvent, un ou plusieurs scénarios successifs s'y déroulent.

Depuis plus d'un siècle, psychologues et neuroscientifiques cherchent à percer le sens de cette « pensée propre au sommeil ». Les difficultés sont de taille. Outre qu'ils défient souvent toute logique, les rêves semblent enfermés dans le cerveau du dormeur, incapable de communiquer pendant leur déroulement – sauf si c'est un « rêveur lucide », comme nous le verrons plus loin.

Les chercheurs ont donc déployé toute une batterie d'instruments de mesure pour, dans un premier temps, comprendre le fonctionnement du cerveau endormi. La polysomnographie combine ainsi l'électroencéphalographie (la mesure des courants à la surface du crâne avec des électrodes) et des mesures physiologiques à l'aide de

L'ESSENTIEL

Les rêves au réveil, les observent « en direct » chez ceux qui parlent ou bougent en dormant et analysent l'activité cérébrale des rêveurs. Dans certains cas, ils parviennent même à interagir avec eux.

Ils percent ainsi les lois

du rêve, mesurant notamment comment le temps s'y écoule, et montrent qu'il remplit de multiples fonctions.

Les rêves entraîneraient par exemple à affronter les menaces, à gérer les émotions négatives ou à comprendre les autres.

capteurs : mouvements des yeux, tonus musculaire, rythme cardiaque, volume respiratoire... Grâce à ces techniques, on sait depuis plus de cinquante ans que le sommeil comporte deux phases, qualifiées de sommeil lent et de sommeil paradoxal ; et contrairement à une idée répandue, nous ne rêvons pas seulement pendant ce dernier, mais aussi pendant une bonne moitié du sommeil lent (voir l'encadré page 29).

Sur la piste des rêves

Moutefois, malgré leur richesse, ces mesures ne donnent aucun accès au vécu subjectif du dormeur. Autrement dit, que se passe-t-il dans ses rêves ?

C'est en combinant plusieurs approches que les chercheurs ont commencé à y voir plus clair... et à percevoir que les rêves ont de multiples fonctions.

La méthode la plus simple, et la plus ancienne, consiste à attendre que le dormeur se réveille et à lui demander de raconter son rêve. Le défi est alors de recueillir les souvenirs avant qu'ils ne s'effacent.



On utilise des « carnets de rêves », où le dormeur transcrit ou dessine ce dont il se rappelle, et, plus souvent aujourd'hui, les smartphones auxquels il dicte son récit.

Nombre de ces récits sont consignés dans des « banques de rêves », telle la Dreambank (www.dreambank.net), créée par William Domhoff, de l'université de Californie à Santa Cruz. Cette banque contient plus de 20 000 rêves, classés par source : un dossier contient par exemple les rêves de 20 enfants de classes primaires, recueillis un jour donné dans une école de San Francisco ; un autre, plus de 4 000 rêves d'une femme nommée Barbara, collectés pendant trente années de sa vie...

L'étude systématique de ces immenses collections a révélé un certain nombre de points communs (voir l'encadré page 30).

Ainsi, les rêves contiennent en moyenne deux fois plus d'émotions négatives (peur, colère, honte) que positives (joie, bonheur, plaisir). Autre exemple, le sexe y est rare : il n'est présent que dans 2 % des rêves des hommes adultes et 0,5 % de ceux des femmes.

Cette méthode permet aussi de comparer les rêves de groupes différents : enfants et adultes, hommes et femmes, voyants et aveugles, valides et paraplégiques... En 2008, William Domhoff a par exemple montré que les Indiens Navajos ont le même taux d'agressivité en rêve que les Suisses, mais que cette agressivité est plus physique chez les premiers et plus verbale chez les seconds ! D'autres résultats sont plus attendus, tel celui obtenu par la neurobiologiste danoise Amani Meaidi en 2014 : les rêves des aveugles contiennent

davantage de sons et de sensations tactiles que ceux des voyants.

Le recueil de rêves est une méthode puissante, mais plus ou moins efficace selon la capacité de chacun à se remémorer ses songes nocturnes. Cette capacité est plus élevée chez les femmes et les personnes créatives, et s'améliore avec l'entraînement. En outre, la récolte est plus fructueuse quand on réveille brutalement le dormeur et qu'on recueille ses souvenirs sans délai.

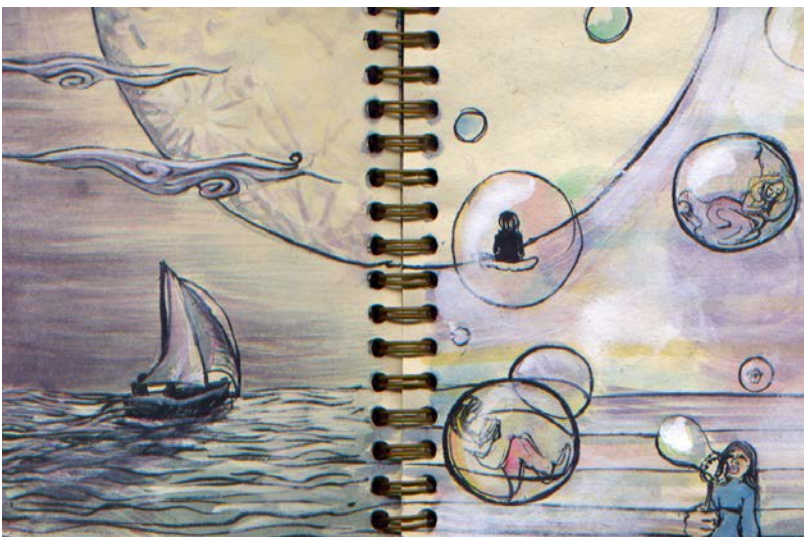
Malgré tout, la méthode reste limitée par l'oubli et le manque de précision. Au réveil, le dormeur ne se rappelle souvent pas avoir rêvé ou en a juste le sentiment vague, sans réussir à préciser le contenu de ses songes (on parle de rêve blanc). L'écrivain Jorge Luis Borges (1899-1986) soulignait déjà la difficulté à « attraper cette corde de sable ». L'idéal serait donc d'observer directement le rêve en cours. Mais comment faire ?

Deux tiers des gens parlent en dormant

Par chance, le dormeur n'est pas totalement immobile et inexpressif pendant la nuit. Il manifeste toute une série de comportements nocturnes, sur lesquels se sont penchés les chercheurs afin de déterminer s'ils traduisent le contenu du rêve. Le plus fréquent est la parole endormie, ou somniloquie. Plus de 70 % des personnes parlent en dormant, même si ce n'est pas systématique (moins de 1 % le font chaque nuit).

Les humains ne sont pas les seuls somniloques, beaucoup d'animaux « parlent » pendant leur sommeil : brefs jappements chez les chiens, hennissements chez les chevaux, chantonement de certaines perniceuses... En 2011, Dorothee Kremers, de l'université de Rennes, et ses collègues ont même montré que des dauphins captifs endormis émettent des sons identiques aux chants de baleines qu'ils ont entendus dans l'aquarium. Le naturaliste français Georges Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788), évoquait déjà le cas des oiseaux dans son *Histoire naturelle* : « Non seulement les rossignols dorment, mais ils rêvent, et d'un rêve de rossignol, car on les entend gazouiller à demi-voix et chanter tout bas. »

Chez les humains, le récit du dormeur à son réveil concorde bien avec les paroles qu'il prononce pendant son sommeil, ce qui montre que ces dernières expriment sa pensée lors du rêve. Voici un exemple de



LES CARNETS DE REVES sont de petits cahiers dans lesquels les dormeurs dessinent ou racontent leurs rêves. Ils révèlent toute l'exubérance et l'étrangeté des songes.

Nous ne rêvons pas que pendant le sommeil paradoxal

Pendant le sommeil paradoxal, l'une des deux grandes phases du sommeil, les yeux bougent sous les paupières, comme si les dormeurs regardaient un film intérieur.

On les réveille lors de cette phase (ils ont alors un souvenir de rêve dans 80 % des cas, contre 50 % si on les réveille lors de la phase qualifiée de sommeil lent).

C'est pourquoi, après la découverte du sommeil paradoxal dans les années 1950, certains chercheurs ont cru que nous rêvions durant cette phase uniquement. Cette croyance est encore tenace dans les ouvrages de vulgarisation. Pourtant, au début des années 1960, le psychologue

américain David Foulkes et ses successeurs ont montré la présence de rêves longs et scénarisés pendant le sommeil lent. C'est le cas même lors d'une courte sieste l'après-midi, qui ne contient habituellement pas de sommeil paradoxal.

Nombre d'études ont depuis confirmé que ce dernier n'est

pas le seul habitacle du rêve. En 2012, nous avons par exemple supprimé le sommeil paradoxal toute la nuit chez des sujets à l'aide d'un médicament, sans jamais abolir leur capacité de rêver.

Tout concourt donc à indiquer que l'activité mentale ne s'arrête jamais au cours du sommeil, mais qu'elle est seulement plus ou moins mémorisée. Pourquoi ces différences ? En 2011, Luigi de Gennaro, de l'université de la Sapienza, à Rome, a montré que l'on se souvient mieux d'un rêve si certaines ondes particulières, qui favorisent aussi la

mémorisation pendant l'éveil, sont très intenses dans le cerveau juste avant que l'on se réveille.

En outre, diverses études ont révélé des différences qualitatives entre les récits obtenus en sommeil lent et en sommeil paradoxal, sans doute liées aux variations de l'activité cérébrale entre ces deux phases. Dans les rêves, les émotions sont par exemple plus intenses pendant le sommeil paradoxal, ce qui pourrait s'expliquer par une activité plus intense de l'amygdale (un centre des émotions dans le cerveau).

ce que nous recueillons sur les bandes-son enregistrées dans notre laboratoire : « Avec ces problèmes c'est mon problème, c'est ton problème, tu te démerdes. [silence] Si tu n'es pas content tu t'en vas ! [silence] Tu m'as presque menacé... [silence] Faut pas refaire ça, parce que je suis le maître chez moi. » Le dormeur prononce uniquement les mots qui sont les siens dans le rêve : lors d'un dialogue, il ne « joue » que son propre rôle et ne dit donc pas à haute voix la réponse de son interlocuteur.

Par moments, il effectue aussi toute une série de petits mouvements : les yeux bougent sous les paupières, les tympans subissent des secousses spontanées (comme si le sujet entendait), le pénis entre en érection, les doigts connaissent de brèves contractions, le visage affiche diverses expressions... Ces mouvements ne correspondent pas tous au contenu mental du dormeur : par exemple, l'érection du pénis est un automatisme sans lien avec le contenu des rêves et les secousses des nouveau-nés endormis sont commandées de façon inconsciente par le tronc cérébral. Mais certains, telles les mimiques faciales, sont bien la traduction corporelle du rêve : on le sait là encore grâce à leur concordance avec le récit du dormeur à son réveil.

Ainsi, il est possible de lire les émotions du rêveur sur son visage, où s'affiche parfois un sourire heureux ou un froncement particulier des sourcils exprimant la colère. Nous n'en avons tiré que peu

Petit glossaire de la nuit

Durant le sommeil, les cycles d'environ 2h30 se succèdent, parfois entrecoupés de microréveils. Chaque cycle est divisé en deux phases.

Le sommeil lent
Les neurones du cortex (la couche de surface du cerveau) s'activent à un rythme plus lent et sont davantage synchronisés que pendant l'éveil. Cette phase, la première du cycle, dure 1h30 en moyenne.

Le sommeil paradoxal
L'activité cérébrale ressemble plus à celle de l'éveil et les muscles sont paralysés (sauf ceux des yeux, des doigts et du visage). Cette phase dure 15 à 60 minutes.

d'enseignements pour l'instant, car l'expression faciale du dormeur adulte commence tout juste à être étudiée, mais la piste est prometteuse. De même, en 2015, Thomas Andrillon, du CNRS, et ses collègues ont montré que lorsque les yeux bougent pendant le sommeil, le cerveau s'active comme s'il explorait une scène visuelle.

Des mouvements qui traduisent le rêve

Dans les cas non pathologiques, les comportements restent limités à ces mimiques faciales, à la parole et aux petits mouvements. Mais ils deviennent beaucoup plus amples chez les victimes de deux maladies : les troubles comportementaux en sommeil paradoxal (TCSP), qui affectent des personnes de plus de 50 ans, et le somnambulisme.

Ce dernier, fréquent pendant l'enfance, persiste parfois à l'âge adulte. Le dormeur se redresse, les yeux ouverts, parle souvent de façon confuse ou apeurée et adopte divers comportements, mimant par exemple la réparation d'une voiture. Dans le cas des terreurs nocturnes (une forme de somnambulisme associée à des émotions particulièrement négatives), il hurle et cherche à s'échapper du lit.

Ces comportements résultent de divers facteurs, tels le stress et un profil génétique particulier. Ils surviennent pendant le sommeil lent. En revanche, les TCSP, comme leur nom l'indique, se produisent pendant

e sommeil paradoxal. Le plus souvent, les patients se bagarrent en dormant et frappent ou injurient des ennemis invisibles. Dans environ 20 % des cas, ils adoptent d'autres comportements qui ne sont pas agressifs : ils fument des cigarettes fictives, chantent, vendent et achètent des objets, mangent, boivent un café...

C'est d'autant plus étonnant qu'en temps normal, un groupe de neurones s'active et paralyse le corps (sauf le visage et les yeux) pendant le sommeil paradoxal, de sorte que la mobilité devrait y être encore plus difficile que lors du sommeil lent. Ces neurones inhibiteurs sont situés dans le locus subceruleus (en haut du tronc cérébral, la zone de l'encéphale qui se connecte à la moelle épinière). Les TCSP sont le signe que ces neurones ne fonctionnent plus correctement ; ils constituent souvent la première étape d'une pathologie neurodégénérative, telle la maladie de Parkinson, d'où l'importance de les détecter. Il est en outre essentiel de traiter les patients, car ils risquent de tomber du lit ou de se blesser, voire d'attaquer leur conjoint.

On comprend depuis moins de vingt ans les causes de ces rêves agités, dont le diagnostic et le traitement sont du ressort des laboratoires de sommeil et non de la psychiatrie. Trop souvent, les patients se dirigent vers un psychanalyste, qui ignore la cause neurologique des TCSP et tente de leur trouver une explication psychologique : nous avons parfois du mal à leur faire comprendre qu'ils n'ont pas d'agressivité « refoulée » expliquant la violence qu'ils manifestent pendant la nuit.

Tout le monde rêve

Bien que pénalisantes, ces maladies donnent aussi accès aux images mentales du dormeur. En effet, si on le réveille pendant qu'il se lémène, il rapporte un rêve congruent aux comportements observés. Plusieurs avancées ont résulté de l'étude de ces derniers. Par exemple, nous pensons désormais que tout le monde rêve, même ceux qui n'en gardent pas le moindre souvenir (soit moins de 1 % de la population), car nos patients qui prétendaient ne jamais rêver s'agitaient toutes les nuits comme les autres.

Qu'ils soient vécus à haute voix, condensés sur le visage des dormeurs ou animés avec tout le corps, les rêves sont donc parfois observables de l'extérieur, comme une singulière pièce de théâtre.

L'AUTEURE



Isabelle ARNULF est professeur de neurologie à l'université Pierre-et-Marie Curie, chef

du Service des pathologies du sommeil à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière et chercheuse à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (Inserm 1127, CNRS UMR 7225), à Paris.

Mais les chercheurs sont-ils condamnés à n'en être que les spectateurs passifs ? Non, car depuis quelques années se développe une méthode qui leur permet de communiquer avec le rêveur et d'interagir avec lui.

D'habitude, nous ignorons que nous sommes en train de rêver. Quand nous nous en apercevons – ce qui est arrivé au moins une fois à presque tout le monde –, cela déclenche en général le réveil. Cependant, certaines personnes sont conscientes de rêver tout en restant endormies et parviennent même à diriger leurs rêves : elles ont apparemment des personnages à volonté, interagissent avec eux, s'envolent face à des ennemis... Cette condition hybride s'appelle le « rêve lucide ».

Deux niveaux de conscience coexistent chez le rêveur lucide : le premier lui permet de vivre son rêve (ressentir des émotions, courir, voler), tandis que le second, qualifié de conscience réflexive, lui fait réaliser que ce n'est pas réel. Les yeux ne sont jamais paralysés pendant le sommeil, de sorte que le rêveur lucide peut envoyer aux chercheurs un signal oculaire particulier (généralement regarder de gauche à droite deux ou trois fois de suite). Le dormeur exécute alors cette action à la fois physiquement et dans son rêve.

Que contiennent les rêves ?

De grandes banques de données recensent plusieurs dizaines de milliers de rêves. Elles renseignent sur les scénarios, les pensées et les émotions qui peuplent nos nuits. Voici quelques-uns de leurs enseignements.

■ Les rêves contiennent en moyenne deux fois plus d'émotions négatives (neur, colère, honte) que d'émotions positives (joie, bonheur, plaisir).

■ Le sexe y est rare : il n'est présent que dans 2 % des rêves des hommes et 0,5 % de ceux des femmes.

■ Dans la majorité des cas, le contenu est ordinaire et met en scène le sujet dans son environnement habituel, parlant avec deux à quatre personnages.

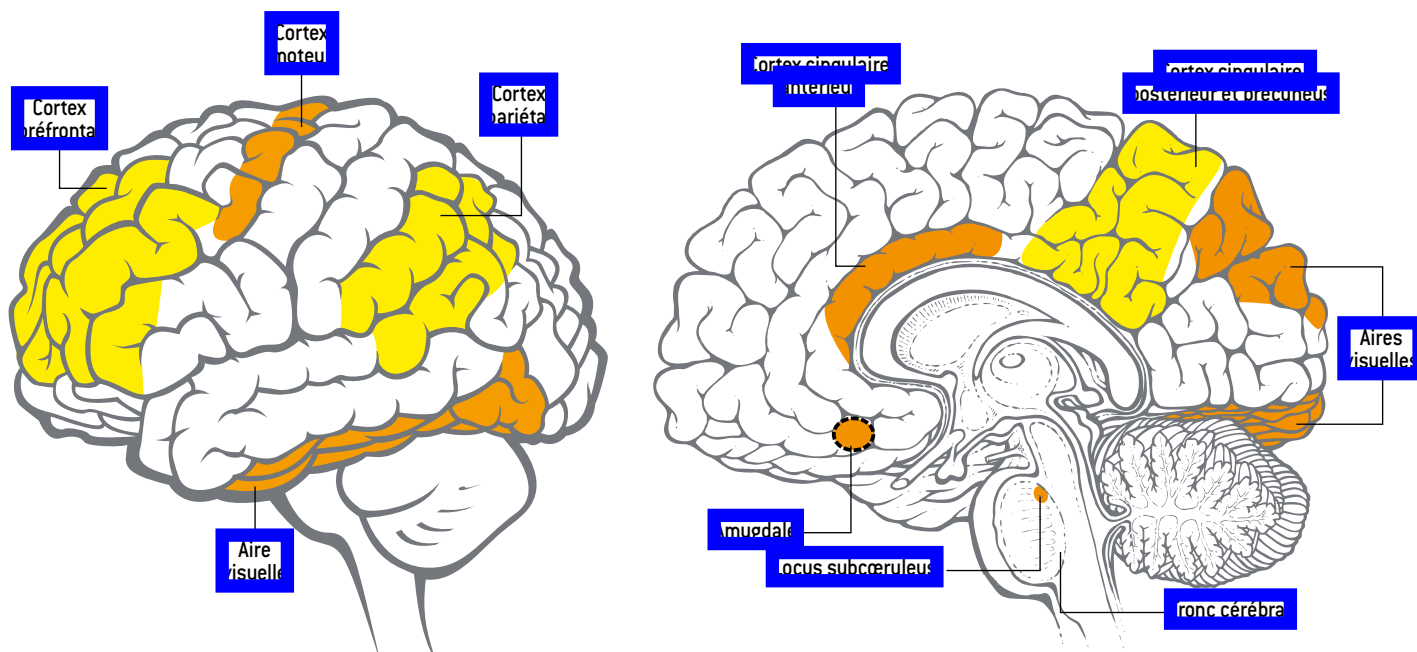
■ Les rêves dits « typiques » de perdre ses dents, d'être nu en public,

de voler ont été faits au moins une fois par quasiment tout le monde, mais ils représentent moins de 1 % de l'ensemble des rêves. Ils sont surtout typiques du biais de rappel, c'est-à-dire du fait que l'on se rappelle plus aisément une chose inhabituelle, marquante, que l'on raconte souvent à ses proches.

■ Les actions complexes mais quotidiennes que sont l'écriture

à la lecture ou le fait de compter sont beaucoup plus rares en rêve que dans la réalité.

■ Les rêves en noir et blanc sont beaucoup moins fréquents que les rêves en couleurs aujourd'hui, mais ils étaient dominants dans les années 1950, quand la télévision était en noir et blanc.



CERTAINES ZONES CÉRÉBRALES sont inhabituellement peu actives pendant le sommeil paradoxal (*en jaune*). C'est le cas notamment du cortex préfrontal, responsable du sens critique et du raisonnement, ce qui expliquerait les événements farfelus survenant dans les rêves de cette phase. D'autres régions sont au contraire très actives (*en orange*), telles que les aires visuelles et le cortex moteur, d'où les multiples mou-

vements et images peuplant les songes. L'amygdale, un centre cérébral des émotions, est aussi souvent hyperactive et inspirerait la forte coloration émotionnelle de nombreux rêves. Pendant le sommeil lent, l'activité cérébrale n'a pour l'instant pas pu être corrélée au contenu des rêves. Lors du sommeil paradoxal, le locus subcéruleus, dans le tronc cérébral, paralyse en outre le corps – sauf dans certaines pathologies.

Grâce à ce petit « télégramme du pays des songes », les chercheurs repèrent les périodes conscientes et corréler en direct des mesures de l'activité cérébrale à des actions rêvées spécifiques, préalablement choisies. Ainsi, Martin Dressler, de l'université de Munich, a montré en 2011 que l'on utilise la même région cérébrale lorsqu'on bouge sa main droite en rêve, en imagination et dans la réalité. La recherche sur le rêve lucide n'en est qu'à ses débuts, mais elle fournit déjà des résultats fascinants : les neuroscientifiques ont par exemple mesuré l'écoulement du temps en rêve (*voir l'encadré page 33*) !

Enfin, si le dormeur ne se souvient jamais de ses rêves, s'il ne les extériorise pas et s'il n'arrive pas à les contrôler, il reste une dernière piste pour les connaître : aller les chercher directement dans son cerveau. En 2012, Tomoyasu Horikawa, de l'université de Kyoto, au Japon, et ses collègues ont créé un logiciel « décodeur de rêve », fondé sur l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Grâce à des mesures chez des sujets éveillés (à qui ils montraient des photographies) ou endormis (qui racontaient ensuite leur rêve), ils ont d'abord associé l'activation de zones particulières du cortex visuel à certaines catégories : telle zone s'activait pour toutes les femmes, telle autre pour toutes les voitures, etc. Ils ont ensuite réussi à prédire la catégorie d'objets vus

en rêve en fonction de l'activité neuronale révélée par l'imagerie, et ce avec un taux de réussite assez élevé : 55 % si le dormeur avait vu une image de nourriture et plus de 77 % si c'était un personnage. Pour la première fois, des chercheurs ont donc lu dans le cerveau endormi.

Ainsi, les neurosciences ont ouvert de multiples fenêtres sur les rêves, dont nous avons rassemblé d'immenses collections. Reste à interpréter ce formidable capharnaüm. Pourquoi rêve-t-on par exemple de voler dans les airs ou de manquer un examen souvent la veille de le passer ? Les chercheurs proposent plusieurs réponses. Non exclusives, d'ailleurs : la pensée humaine a de multiples fonctions – apprendre, se développer, prévoir, s'adapter –, pourquoi le rêve, qui occupe plus du quart de notre vie, n'en aurait-il qu'une ?

Simplement le bruit de la machine ?

À la question « quel est le sens des rêves ? », Alan Hobson, de l'université Harvard, a une réponse plutôt radicale : aucun. Pour lui, les rêves ne sont qu'une conséquence secondaire du fonctionnement nocturne du cerveau. Un « activateur » allumerait l'hippocampe, ainsi que les régions sensorielles et émotionnelles, qui formeraient alors des

images ou des sensations spontanées issues de notre mémoire. Cet activateur pourrait par exemple être le locus subcéruleus, la petite zone du tronc cérébral qui non seulement neutralise le tonus musculaire pendant le sommeil paradoxal, mais aussi déclenche les secousses des extrémités et fait bouger les yeux.

Certaines observations suggèrent effectivement que le tronc cérébral déclenche les premiers éléments du rêve. Elles concernent des patients victimes d'un syndrome neurologique rare : la perte d'autoactivation psychique, où plus aucune pensée spontanée ne vient à l'esprit pendant l'éveil. Nous avons constaté qu'ils ont tout de même des rêves, mais très courts et peu scénarisés : autrement dit, grâce peut-être à l'activateur du tronc cérébral, quelques images sont évoquées, mais pas plus car le reste du cerveau ne peut « broder » dessus.

Dans les cas non pathologiques, les histoires abracadabrantes des rêves ne seraient alors que des tentatives désordonnées du cerveau d'interpréter les éléments disparates allumés par le tronc cérébral. Le neurologue américain Howard Roffwarg résume ce point de vue en disant que « le rêve naît dans le tronc cérébral, puis est habillé par le reste du cerveau ».

Des éléments externes, tels qu'un bruit dans la pièce, seraient aussi parfois perçus



DANS CERTAINES PATHOLOGIES, LES PATIENTS S'AGITENT violemment pendant leur sommeil. Quand on les réveille, ils racontent un rêve concordant avec leur comportement. Il suffit donc d'observer ce dernier pour connaître le contenu des songes. Nombre de rêves

mettent en scène un danger mortel (ici, le dormeur lutte contre quelqu'un qui tente de l'étouffer), ce qui accrédite la théorie dite de « simulation de la menace » : nos rêves nous entraîneraient à affronter les dangers de la vie réelle.

et interprétés. En 1958, William Dement, de l'université Stanford, en Californie, a ainsi obtenu des rêves de pluie après avoir vaporisé un peu d'eau sur le visage de personnes endormies. À d'autres moments de la nuit, le cerveau se coupe presque totalement du monde extérieur, ce qui favorise sans doute les rêves dits vestibulaires (voler, sortir de son corps, se déplacer en nageant) : ne percevant plus l'information sensorielle liée à la pesanteur, le cerveau imagineait les scénarios pour expliquer cette absence. Lors du sommeil paradoxal, à l'inverse, créerait des rêves où fuir est impossible par exemple parce que les pieds sont collés au sol) en sentant la paralysie – réelle – du corps.

Cependant, je n'adhère pas à la théorie déniait tout sens aux rêves. Si certaines catégories de rêves semblent bien se contenter de traduire les contraintes et les libertés imposées à la pensée pendant le sommeil, d'autres paraissent remplir un rôle. Ainsi, le fonctionnement du cerveau endormi pourrait avoir été en partie sélectionné au fil de l'évolution et procurer divers avantages. C'est la position de la majorité des chercheurs.

À la fin du XIX^e siècle, Sigmund Freud fut le premier scientifique à proposer un rôle pour les rêves : selon lui, ces derniers servent d'exutoire et expriment l'inconscient de la personne, notamment ses désirs refoulés pendant l'éveil. Le contenu manifeste du rêve ne correspondrait pas directement à ces désirs perturbants, car ceux-ci seraient masqués par une censure qui persisterait pendant le sommeil, d'où leur aspect étrange. Par la suite, la psychanalyse a généralisé cette hypothèse en supposant que les rêves

expriment des désirs non comblés dans la journée, conscients ou non. Freud supposait également que les terreurs nocturnes traduisent un traumatisme oublié.

Les théories freudiennes ont été énormément popularisées et beaucoup de patients y croient encore, alors qu'elles n'ont reçu aucune confirmation scientifique. Au contraire, plusieurs expériences

en Finlande, a proposé une théorie novatrice, selon laquelle les rêves servent à simuler une situation dangereuse pour mieux l'affronter dans la réalité. Antti Revonsuo a en effet constaté que les attaques, les poursuites et les animaux dangereux y sont très fréquents. Les rêves des jeunes adultes comportent ainsi 60 à 77 % d'éléments de menace et ceux des chiens ou des chats, trahis par les mouvements qu'ils font dans leur sommeil, semblent emplies de chasses et de bagarres.

Selon le psychologue, cela permettrait d'entraîner nos stratégies de défense : fuir, contre-attaquer, s'adapter. Le rêve est sur ce point supérieur à l'imagination, car le dormeur croit vraiment vivre la situation, éprouve les mêmes émotions que dans la réalité et se déplace dans un univers à trois dimensions où tous les organes sensoriels et moteurs fonctionnent, quoique virtuellement. Par la suite, Antti Revonsuo a étendu sa théorie aux menaces sociales : l'exclusion d'un groupe, que l'on retrouve souvent dans les rêves, signifiait une mort certaine à des époques ancestrales.

L'étude menée en 2007 par Tore Nielsen, de l'université de Montréal, soutient la théorie de la simulation des dangers. Le psychologue a analysé les rêves de 200 jeunes mères après l'accouchement : 86 % concernaient leur bébé et 73 % le préentaient en danger (étouffé par mégarde dans le lit maternel ou tombant du berceau), conduisant souvent au réveil brusque de la mère.

Les troubles que nous filmions chaque nuit dans notre service des pathologies du sommeil accréditent aussi cette théorie : les



exploitant les banques de rêves remettent en cause le rôle d'exutoire de ces derniers. En 1970, le neurologue Ismet Karacan a ainsi demandé à de jeunes adultes masculins de se priver de masturbation et de relations sexuelles pendant deux semaines afin de déterminer si la fréquence de leurs rêves érotiques augmentait : que nenni !

En 2000, le psychologue et philosophe Antti Revonsuo, de l'université de Turku, en

erreurs nocturnes mettent presque toutes en scène des menaces mortelles imminentes (plafond qui s'écroule, noyade, serpents), auxquelles le dormeur réagit en fuyant le lit, tandis que les cauchemars liés aux troubles comportementaux en sommeil paradoxal comportent surtout des agressions; le dormeur contre-attaque alors à violents coups de poings ou pied.

Les rêves ne servent-ils qu'à nous protéger d'une mort violente ou nous permettent-ils d'anticiper d'une façon plus générale? C'est ce que nous avons testé en 2013. Nous nous sommes penchés sur le cas d'étudiants qui, le lendemain, passaient le concours de première année de médecine, à l'université Pierre-et-Marie-Curie. Quelque 60 % d'entre eux ont rêvé du concours et, en majorité (78 %), de façon négative: panne de réveil, arrivée en retard, oubli de la carte d'étudiant, incapacité à

trouver la réponse... L'un d'eux a même rêvé qu'il devait rédiger son devoir sur la mie de pain!

Ce type d'anticipations plus ou moins fantaisistes incorpore parfois des éléments perçus inconsciemment dans la journée et met en scène des associations et des déductions inédites. Les rêves sont donc une formidable machine à élaborer des scénarios. Et cette machine fonctionne plusieurs heures par nuit! Cela expliquerait qu'un grand nombre de gens ont parfois l'impression de réaliser un rêve prémonitoire: des centaines de scénarios imaginaires se déroulant chaque nuit dans nos têtes, la probabilité que l'un d'eux survienne effectivement le lendemain est non négligeable.

De façon intéressante, chez nos étudiants, les rêves d'échec ont été une mauvaise prédiction mais un bon présage, puisque ceux qui les avaient faits ont mieux

réussi que les autres: ils ont obtenu en moyenne un demi-point supplémentaire, ce qui correspond à un bond de cent places dans le classement.

Il semble donc que le cerveau dramatise le quotidien de chacun pendant le sommeil et que ces scénarios catastrophes lui procurent un gain cognitif. En jouant mentalement les événements à l'avance, il apprendrait à éviter les pires comportements et à garder les meilleurs. Gageons que les candidats ayant oublié leur carte d'étudiant en rêve ont bien vérifié qu'elle était dans leur portefeuille avant de partir à l'examen!

Cette dramatisation nous entraînerait en outre à gérer les émotions négatives. Quel acteur n'a pas rêvé qu'il faisait un tour la veille d'une première? Il sera un peu moins stressé le lendemain pour avoir déjà vécu la représentation en rêve.

Le temps du rêve

Une croyance erronée et répandue rapporte que nous créerions les rêves instantanément au réveil. Cela supposerait une condensation fulgurante du temps:

d'une minute s'écoule en réalité. Mais de nombreuses études ont montré que le rêve est bien construit pendant le sommeil et que le temps s'y écoule - presque - comme celui de l'éveil.

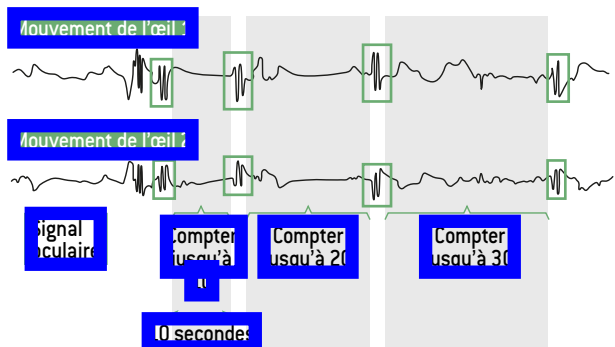
En 1958, William Dement a ainsi utilisé des jalons sensoriels: il a exposé des dormeurs à des sons (des sonneries de porte) et des lumières (des flashes de lampe), puis les a réveillés 10 minutes après. Un quart des rêves recueillis avaient incorporé le son ou la lumière dans leur scénario, les dormeurs rapportant par exemple que « des amis ont sonné à la porte ». Et surtout, la longueur du scénario rêvé à partir de cet indice et jusqu'au réveil 10 minutes plus tard correspondait à la durée qu'il aurait approximativement eue dans la réalité: « Des amis ont sonné à la porte; je leur ai préparé du thé. Nous discutons tranquillement en le buvant quand vous m'avez réveillé. »

Une autre méthode pour mesurer le temps du rêve se fonde sur les pathologies où les dormeurs extériorisent leurs rêves. Les patients effectuent en effet les mêmes gestes que dans la réalité, et dans le même temps: le fumeur porte calmement sa cigarette fictive à sa bouche, inspire longuement, expire doucement puis la tapote et l'écrase dans un cendrier invivable; l'ancien menuisier qui construit un escalier tape avec son marteau pendant une heure de sommeil paradoxal, sans « court-circuit temporel »...

Enfin, en 2014, Daniel Berchger, de l'université de Bâle, en Suisse, a travaillé avec des rêveurs lucides (qui sont conscients de rêver et savent effectuer des actions délibérées dans leur rêve). Il les a fait

compter jusqu'à 10, 20 et 30 pendant l'éveil, puis en rêve. Il leur a aussi demandé de marcher 10, 20 et 30 pas et de réaliser 10, 20 et 30 accroupissements successifs dans les deux circonstances. Pendant son sommeil, le rêveur lucide signalait le début et la fin de chaque action par des signaux oculaires, ce qui permettait d'en calculer la durée. Celle-ci était un peu plus longue en rêve qu'en réalité, la différence la plus remarquable portant sur les actions physiques

comme la marche et l'accroupissement). Par exemple, compter jusqu'à 20 prenait en moyenne 7 secondes en éveil et 22,4 secondes en rêve lucide. Marcher 30 pas prenait 8,5 secondes en éveil et 28,6 secondes en rêve lucide. Notons que le temps relatif était conservé pendant le rêve: marcher 30 pas durait 3 fois plus de temps que marcher 10 pas. Globalement, le temps du rêve n'est donc pas si différent de celui de l'éveil.



COMPTER JUSQU'À 10 EN RÊVE prend en moyenne 11,1 secondes, contre 8,9 lorsque nous sommes réveillés. C'est ce qu'a montré une expérience où des rêveurs dits lucides (car ils sont capables de contrôler leurs rêves) ont signalé les moments où ils commençaient et arrêtaient de compter par un code oculaire (deux allers-retours des yeux, mesurés par des caméras).

Le rêve est particulièrement riche en émotions négatives quand il survient pendant le sommeil paradoxal, phase où l'amygdale (un centre des émotions dans le cerveau) est très active. Tore Nielsen et Ross Levin, de l'université de Montréal, proposent que la configuration particulière du cerveau lors de cette phase lui permette de s'habituer plus facilement aux images et aux émotions en les jouant « à vide ». En effet, des systèmes cérébraux essentiels pour l'humeur et les réactions de fuite ou de défense sont inactifs : les images émouvantes ne les mobiliseront donc pas. En outre, l'hippocampe (siège de la mémoire à court terme) dialoguerait avec l'amygdale, ce qui rendrait les frayeurs ou les difficultés de la veille plus « digestes » en les associant avec d'autres éléments à mémoriser, plus neutres et sans forcément de rapport. Cela serait la source de certaines associations bizarres se produisant dans les rêves.

Un tel entraînement émotionnel serait plus généralement une fonction du sommeil : « Le plus court chemin entre le désespoir et l'espoir est une bonne nuit de sommeil », stipule un proverbe populaire. En 2011,

Matthew Walker, de l'université de Berkeley, en Californie, a présenté des images horribles (scènes de guerre ou de meurtre) à des sujets et montré que leur amygdale s'active d'abord fortement, puis quasiment plus lors d'une deuxième présentation après une nuit de sommeil. Les images étaient pourtant parfaitement mémorisées, signe que le cerveau gardait l'information de façon moins émotionnelle, mais plus efficace. L'activité de l'amygdale était d'autant plus émoussée que le lobe préfrontal (une zone située à l'avant du cerveau et responsable du raisonnement et de la maîtrise de soi) s'était activé pendant le sommeil paradoxal, comme si le dialogue entre l'émotion et la raison qui s'y était déroulé avait durablement modifié leurs rapports, pour le plus grand bien du dormeur.

Consolider la mémoire

Une autre théorie stipule que les rêves améliorent la mémorisation des événements de la veille, dont ils joueraient une version remodelée. De nombreuses expériences montrent que le fait de dormir après un apprentissage

d'un nouvel air de piano, d'une récitation, de l'emplacement d'un restaurant) améliore les performances, davantage qu'une période d'éveil de durée équivalente. La séquence de piano, par exemple, est mieux jouée, avec moins de fautes et plus vite. Le gain de performance est de l'ordre de 20 %, que ce soit après une sieste un peu longue d'environ une heure et demie) ou une nuit complète. En outre, les régions cérébrales (et même les neurones précis) qui ont travaillé lors de l'apprentissage se réactivent pendant le sommeil ; et le lendemain, la performance est d'autant meilleure que cette réactivation était intense.

Cela signifie-t-il que la tâche apprise transparaît dans le contenu du rêve lui-même ? Il semble que ce soit souvent le cas. Plusieurs études ont révélé de nombreuses ressemblances entre les éléments du rêve (lieu, objets, personnes) et les événements vécus pendant la journée. En 2003, Magdalena Fosse, de l'école de médecine Harvard, et ses collègues ont par exemple demandé à des sujets de noter et de comparer leurs rêves et leurs activités journalières pendant deux semaines : plus de la moitié des thèmes, des émotions et des personnages vécus étaient en lien avec les événements vécus récemment.

Il s'agissait rarement d'une répétition exacte des faits, qui étaient plutôt incorporés dans d'autres scénarios. Cela suggère que ce que nous apprenons le jour est intégré, non pas comme une copie conforme, mais par fragments, comme une (re)construction par briques, dans notre cerveau rêvant.

La consolidation des souvenirs est particulièrement intense pendant le sommeil lent. Diverses régions cérébrales s'allument alors en alternance, d'autant plus souvent et plus intensément qu'elles ont travaillé dans la journée. Ainsi, quand un rat apprend à retrouver son chemin dans un labyrinthe, les mêmes neurones (nommés neurones de lieu) s'activent pendant l'éveil et lors du sommeil lent qui suit. Est-ce le signe que le rat rêve de son labyrinthe ? Peut-être, mais difficile de lui demander la confirmation...

Des travaux publiés en 2010 par Robert Stickgold, de l'université Harvard, confirment en tout cas qu'un apprentissage est d'autant plus efficace que nous en rêvons par la suite. Dans cette étude, des étudiants se sont initiés à un jeu vidéo de labyrinthe, puis ont effectué une sieste de 45 minutes : ceux qui ont eu des rêves en lien avec la tâche apprise étaient ensuite trois fois plus



APRÈS AVOIR EMBALLÉ DES PAQUETS DE NOËL toute la journée, une patiente somnambule a emballé tous les objets de sa table de nuit dans sa housse de couette en dormant. Ainsi, pendant notre sommeil, et notamment dans les rêves, nous jouons une version remodelée des événements vécus récemment. Les rêves permettraient alors de consolider les apprentissages.

performants que les autres, même quand le rien n'était que parcellaire (certains avaient juste entendu la musique du jeu).

Nos résultats sur les pathologies du sommeil fournissent aussi quelques éléments étayant cette théorie. Par exemple, nous avons enseigné à des somnambules une chorégraphie des mains, qu'une patiente a partiellement répétée en dormant, signe qu'elle en rêvait. Elle l'a bien mieux réalisée le lendemain.

Le fait que les événements vécus ne soient pas rejoués à l'identique, mais passés à la moulinette cérébrale accroît également la créativité, les rêves favorisant les idées et les associations inédites. Plusieurs études ont montré que nous trouvons plus facilement la solution d'un problème en dormant dessus. Dans l'une d'elles, réalisée en 2004, Ullrich Wagner, de l'université de Lübeck, en Allemagne, a présenté une épreuve issue d'un test d'intelligence à des étudiants. Ceux qui dormirent ensuite furent deux fois plus nombreux à en découvrir la règle. Et nombre d'anecdotes suggèrent que la créativité et les associations d'images propres au sommeil transparaissent dans le rêve : par exemple, au XIX^e siècle, le chimiste allemand August Kekulé aurait découvert la structure cyclique du benzène en rêvant d'un serpent qui tourne à l'intérieur de la molécule et le chimiste russe Dmitri Mendeleïev, auteur du célèbre tableau périodique des éléments, a déclaré : « J'ai vu dans un rêve un tableau où tous les éléments tombaient à la bonne place. »

Se mettre à la place des autres

Enfin, le rêve aurait une fonction sociale. Qui n'a jamais été le héros nocturne du film vu avant d'aller au lit ? Quelle femme n'a pas été une fois un homme en rêve ? Point d'homosexualité refoulée ici, malgré ce qu'explique la psychanalyse : il semble plutôt s'agir d'un exercice de notre capacité à nous mettre à la place des autres, qui inclut l'empathie (le partage des émotions). Cette capacité est fondamentale pour la vie sociale. Elle se développe vers l'âge de quatre ans grâce à des neurones dits « miroirs », qui s'activent de la même façon quand nous exécutons une action et quand nous voyons un congénère la réaliser. Notre cerveau « joue » alors mentalement cette action en miroir.

Et quand nous nous plaçons dans la peau d'un autre en rêve, nous y crovons

encore plus que pendant l'éveil. Le drôle de rêve que m'a raconté Pierre, un patient incapable d'aider son épouse enceinte, car il était bloqué dans un lit d'hôpital, en est une belle illustration : privé de bras et de jambes, il ne pouvait rien faire, puis soudain il a accouché en rêve et tout allait mieux.

Nous avons alors supposé que le rêve entraîne à comprendre les autres et à partager leurs émotions *via* la réactivation des neurones miroirs. Selon nous, c'est ce qui s'est produit chez des paraplégiques de naissance que nous avons étudiés : tous marchaient en rêve, dansaient, couraient, pédalaient, jardaient ou tapaient dans un ballon. Alors qu'ils n'avaient jamais effectué ces actions, ils étaient capables de les réaliser en rêve, sans effort mental, probablement parce qu'ils les avaient vu exécuter par des personnes valides autour d'eux. Là encore, le rêve semble plus puissant que l'imagination pour simuler un phénomène de façon réaliste, puisque nous y croyons plus et que nous sommes plongés dans un mélange complet de sons, de sensations, d'images et d'émotions.

Alors, d'où viennent les rêves ? Les neurosciences cognitives, combinées à l'immense richesse de l'observation clinique en médecine du sommeil, donnent quelques réponses. Cette activité nocturne singulière semble avoir été en partie sélectionnée au fil de l'évolution pour accomplir diverses fonctions : simuler les menaces, anticiper, mémoriser, gérer les émotions négatives, consolider la mémoire, produire des idées nouvelles et faciliter la vie en société. Mais ces nombreux éléments disparates qui s'assemblent au sein des rêves n'ont peut-être pas tous un rôle et certains pourraient juste traduire les contraintes pesant sur le fonctionnement mental pendant le sommeil, ainsi que certaines perceptions extérieures.

Les rêves dits « typiques » (voler, être nu en public, perdre ses dents) illustrent bien ces origines multiples. Dans ceux où l'on vole, le cerveau tenterait d'interpréter l'abolition de la sensation de pesanteur. Ceux où l'on est nu résulteraient de la perception temporaire du fait d'être réellement nu (ou en tout cas moins habillé que d'habitude) dans son lit. Quant à ceux où l'on perd ses dents, il s'agirait de souvenirs anciens qui sont réactivés, sous une forme un peu déformée. Pas étonnant, avec cette diversité d'origines et de fonctions, que les rêves soient d'une telle exubérante variété! ■

5 fois plus de personnes parviennent

à résoudre un test d'intelligence après avoir dormi

BIBLIOGRAPHIE

Andrillon *et al.*, Single-neuron activity and eye movement during human REM sleep and awake vision, *Nature Communications*, vol. 6, pp. 1-10, 2015.

Arnulf, Une fenêtre sur les rêves. Odile Jacob, 2014.

Arnulf *et al.*, Will students pass a competitive exam that they failed in their dreams ?, *Consciousness and Cognition*, vol. 29, pp. 36-47, 2014.

Horikawa *et al.*, Neural decoding of visual imagery during sleep, *Science*, vol. 340, pp. 639-642, 2013.

Un océan dans une flûte de champagne

Sébastien Liger-Belair, Clara Cilindre, Fabien Beaumont et Guillaume Polidor

Les effets de condensation observés lors du débouchage d'une bouteille de champagne et les mouvements tourbillonnaires imprimés au liquide par la remontée des bulles rappellent certains phénomènes atmosphériques ou océanographiques.

Au cours des dernières décennies, la science des bulles et des mousses s'est considérablement développée. Physiciens, chimistes et mathématiciens sont passionnés pour ces objets fragiles aux propriétés extraordinaires. Cependant, et à notre grande surprise, les processus liés à la formation des bulles dans un vin de Champagne sont restés jusqu'à peu totalement inexplorés. Or le champagne permet aux scientifiques d'entreprendre un périple dans le monde fascinant des bulles, des gaz dissous, des changements de phase et des fluides en mouvement.

De nombreux savoirs ont été ainsi acquis, sans épuiser toutes les questions posées. Ici, nous nous limiterons à présenter quelques-uns des phénomènes qui accompagnent une dégustation de champagne, mais qui se retrouvent aussi à de tout autres échelles, en particulier celles de l'atmosphère et de l'océan.

Le débouchage d'une bouteille à l'étude

Intéressons-nous par exemple à ce qui se passe lorsqu'on débouche une bouteille de champagne. Avant cette opération, l'air enfermé dans la bouteille est sous pression. En effet, à la suite d'une seconde fermentation alcoolique en bouteille close (on l'appelle la prise de mousse), les vins de Champagne et les vins effervescents élaborés selon la

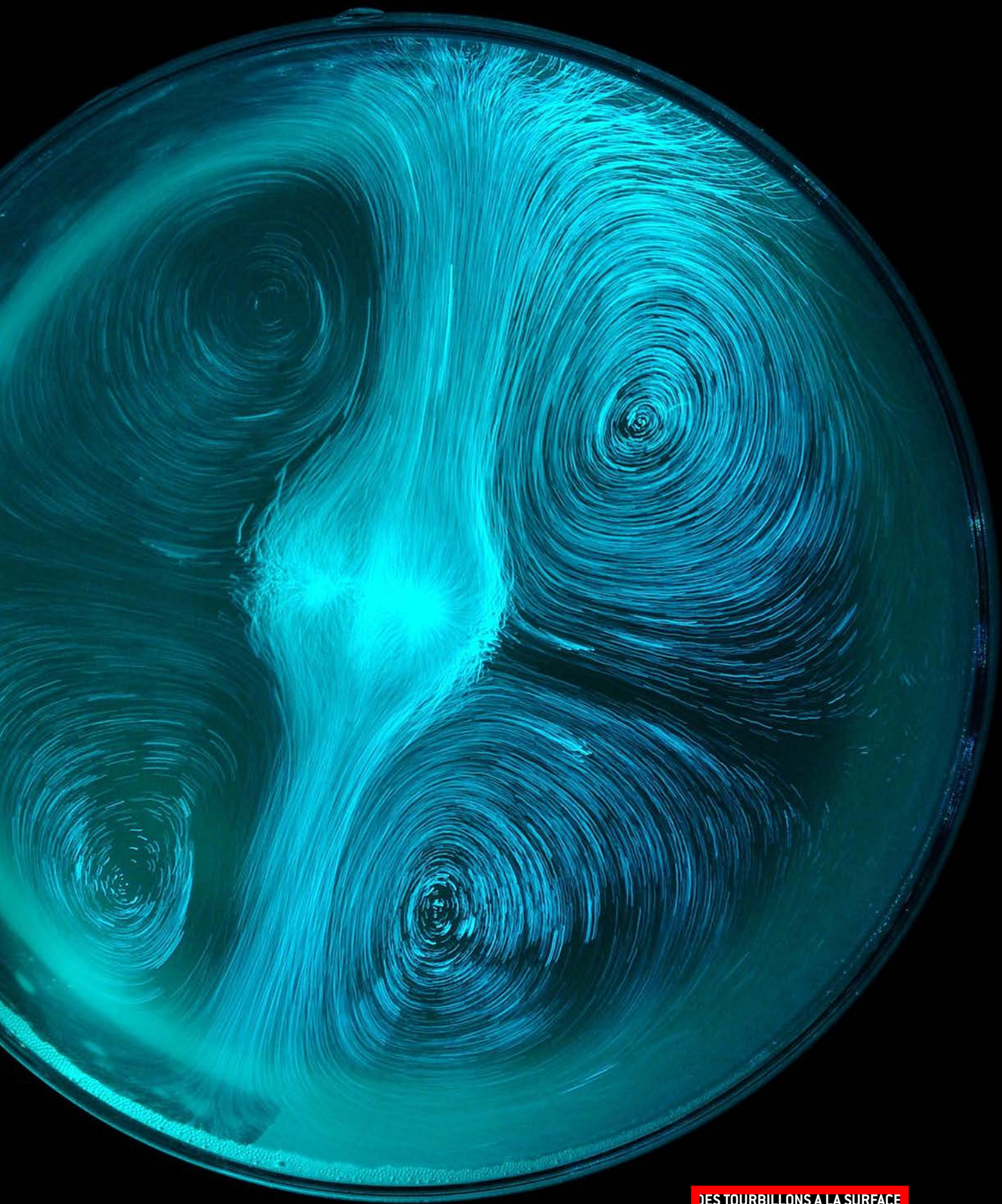
L'ESSENTIEL

Le champagne et sa dégustation font l'objet depuis quelques années d'études scientifiques détaillées.

L'imagerie ultrarapide permet d'analyser les processus de condensation à l'œuvre lors du débouchage d'une bouteille.

La tomographie laser révèle les mouvements tourbillonnaires du vin créés par la remontée des bulles.

Les phénomènes observés ressemblent à ceux qui animent l'atmosphère et les océans.

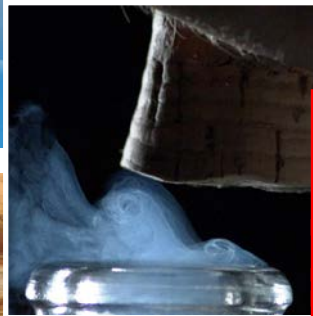


DES TOURBILLONS A LA SURFACE
d'une coupe de champagne,
visualisés par tomographie laser

DEBOUCHAGE D'UNE BOUTEILLE REFRIGEREE

Cette séquence d'images prises par une caméra ultrarapide montre le premier millième de seconde de l'éjection du bouchon d'une bouteille de champagne stockée au réfrigérateur, à 6 °C. La décompression brutale du gaz contenu dans le col de la bouteille fait chuter sa température de

plusieurs dizaines de degrés, ce qui provoque la condensation de la vapeur d'eau ambiante en un brouillard de gouttelettes, dont la taille va de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. Ces gouttelettes diffusent la lumière dans toutes les longueurs d'onde, d'où la teinte blanchâtre.



LORSQU'ON DEBOUCHE DELICATEMENT une bouteille de champagne, en retenant le bouchon, le nuage de condensation présente en général une petite ondulation. Il s'agit d'une instabilité dite de Kelvin-Helmholtz. Bien connu des physiciens, ce phénomène se produit à la frontière entre deux fluides, quand l'un glisse sur l'autre à une vitesse relative dépassant un certain seuil. De telles instabilités sont visibles à des échelles plus grandes, par exemple dans l'atmosphère de la Terre (*en haut*) et dans celle de Jupiter (*en bas*), où elles sont spectaculaires.

La méthode traditionnelle champenoise se charge en gaz carbonique (CO_2) dissous. Conformément à la loi dite de Henry, en fin de prise de mousse, la concentration en CO_2 dissous dans le vin est proportionnelle à la pression partielle de CO_2 (la part de la pression due au CO_2) dans le col de bouteille. Or la solubilité du CO_2 dans le vin étant très sensible à la température (plus le vin est froid, plus le CO_2 y est soluble), la pression dans la bouteille sera aussi très sensible à la température.

Cinq fois la pression atmosphérique à 6 °C

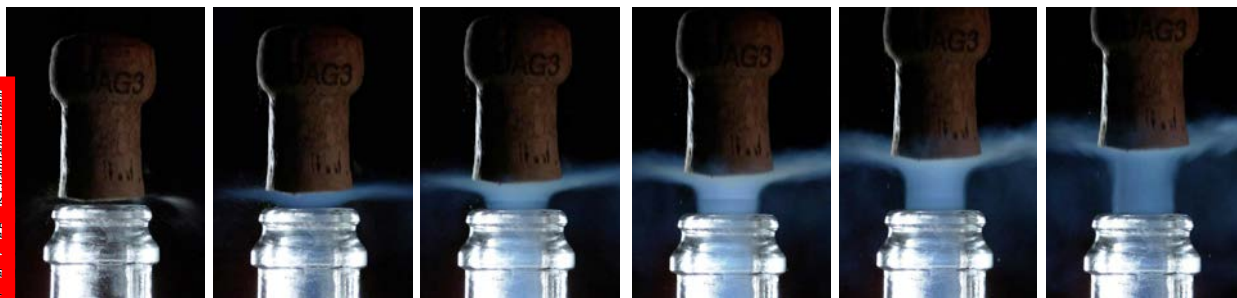
Ainsi, dans une bouteille de champagne de 75 centilitres (traditionnellement tiré à 24 grammes de sucre par litre au moment de la prise de mousse), la pression augmente avec la température: d'environ 5 bars à 6 °C, elle atteint presque 8 bars à 20 °C, tandis que la concentration en CO_2 du vin diminue d'environ 11,7 à 11,5 grammes par litre. La force exercée par le gaz carbonique sous pression dans le col de la bouteille étant à l'origine de l'éjection du bouchon, la température doit de toute évidence jouer un rôle sur le débouchage.

Pour étudier cet aspect du débouchage et d'autres, nous avons recouru à l'imagerie scientifique, qui a beaucoup progressé ces dernières années, notamment avec l'avènement des capteurs numériques et la miniaturisation des circuits électroniques. Il existe aujourd'hui des caméras ultrarapides susceptibles de nous dévoiler des phénomènes d'une extrême fugacité, et

DEBOUCHAGE D'UNE BOUTEILLE A TEMPERATURE AMBIANTE

A température ambiante, la pression qui éjecte le bouchon est plus importante (environ 8 bars à 20 °C). Le nuage de condensation est dans ce cas bien plus délimité et, au lieu d'être blanchâtre, il est bleuté. Cette teinte indique un régime de diffusion lumineuse où la taille des gouttelettes

de condensation est inférieure aux longueurs d'onde de la lumière visible : dans ce cas de figure, les gouttelettes diffusent davantage la partie bleue du spectre lumineux que sa partie rouge, d'où un nuage bleuté. Le phénomène est analogue à celui responsable du bleu du ciel.



Nous avons utilisé un appareil de ce type. Nous nous sommes rapprochés de notre collègue Jacques Honvault, spécialiste de l'imagerie ultrarapide.

Décortiquer les premiers millièmes de seconde

Filmer à haute vitesse nécessite énormément de lumière. Un projecteur de cinéma de 5000 watts éclaire la scène par l'arrière. On peut ainsi filmer les tout premiers millièmes de seconde du débouchage d'une bouteille de champagne stockée au réfrigérateur, à 6 °C (voir la figure page ci-contre).

La décompression brutale du volume de gaz qui jaillit hors du col s'accompagne d'une chute de sa température de plusieurs dizaines de degrés (c'est une « détente adiabatique »). Cette chute brutale de la température provoque instantanément la condensation de la vapeur d'eau environnante en un brouillard de minuscules gouttelettes dont la taille varie de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. C'est la diffusion de la lumière du projecteur par ces gouttelettes (de façon presque isotrope dans l'espace, pour toutes les longueurs d'onde du spectre visible) qui rend ce brouillard visible et lui confère sa couleur blanchâtre.

A une tout autre échelle, celle de l'atmosphère, les nuages voient le jour selon le même principe. Des masses d'air chargées de vapeur d'eau montent en altitude et se refroidissent progressivement. Ce refroidissement provoque la condensation de l'eau

LES AUTEURS

Gérard LIGER-BELAIR est professeur de physique à l'université de Reims. Il y a créé l'équipe Effervescence (étude des bulles et des mousses dans les liquides chargés en gaz dissous) au sein du Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique (UMR CNRS 2331).

Clara CILINDRE est maître de conférences et membre de l'équipe Effervescence à l'université de Reims.

Fabien BEAUMONT est ingénieur d'études au sein du Groupe de recherche en sciences pour l'ingénieur de l'université de Reims.

Guillaume POLIDORI est professeur de mécanique des fluides au sein du Groupe de recherche en sciences pour l'ingénieur de l'université de Reims.

qu'ils contiennent en masses nuageuses, que la diffusion de la lumière solaire rend visibles.

Toutes les bouteilles stockées à 6 et à 12 °C ont présenté des nuages de condensation similaires dans leur structuration et leur couleur blanc-gris. Cependant, le lot de bouteilles stocké à température ambiante nous réservait une surprise. Pour ces bouteilles où la pression est plus importante, de l'ordre de 8 bars, le nuage de fumée blanchâtre disparaît (voir la figure ci-dessus). Dans le sillage du bouchon qui saute, on retrouve une structure bien plus éphémère, moins étendue et surtout... étrangement bleutée.

A la température ambiante, un panache bleu comme le ciel

Le panache bleu azur qui accompagne le débouchage d'une bouteille sous haute pression a très certainement pour origine la petite taille des noyaux de condensation qui diffusent la lumière ambiante. En effet, conformément à la théorie de la diffusion de Rayleigh, si la taille de ces noyaux devient bien inférieure aux longueurs d'onde du spectre de la lumière ambiante (qui vont de 0,4 micromètre pour le bleu à 0,8 micromètre pour le rouge), la diffusion de la lumière se fait bien plus efficacement pour les petites longueurs d'onde du spectre, donc pour la lumière bleue. Le nuage apparaît alors bleuté et non plus blanc.



LA VISUALISATION DE L'ÉCOULEMENT
 Par tomographie laser révèle les tourbillons qui se forment dans une flûte de champagne. Ces mouvements du liquide sont engendrés par la remontée des bulles.

Le même phénomène explique pourquoi le ciel nous apparaît bleu. Les molécules de l'atmosphère terrestre sont bien plus petites que les longueurs d'onde de la lumière solaire. Le bleu est donc plus efficacement diffusé que les autres couleurs du spectre, ce qui confère à l'atmosphère sa teinte bleue.

Un modèle thermodynamique est en cours d'élaboration pour rendre compte de la différence de taille caractéristique des noyaux de condensation qui se forment au débouchage en fonction de la température initiale des bouteilles.

En filmant le processus à 12 000 images par seconde, on distingue même une onde de choc, parallèle au goulot de la bouteille, qui progresse dans le sillage éjecté du bouchon qui jaillit (voir les photographies ci-dessous). On remarque aussi que, une fois libéré du col de la bouteille dans lequel il était comprimé, le bouchon reprend très vite sa forme en « jupe » si caractéristique : les parois cellulaires du liège confèrent au bouchon une extraordinaire résilience.

Débouchage en douceur :

une instabilité de Kelvin-Helmholtz

Il est d'usage d'ouvrir une bouteille de champagne sans laisser le bouchon sauter librement, mais en le retenant délicatement. Le gaz carbonique sous pression s'échappe alors avec un chuintement très caractéristique. La décompression est moins brutale, ce qui permet toujours à la vapeur d'eau de se condenser, mais sous la forme d'une fumerolle dont les

caractéristiques aérodynamiques diffèrent nettement de celles du panache qui accompagne un débouchage brutal. Le brouillard de minuscules gouttelettes s'échappe parallèlement au goulot de la bouteille sous la forme d'une couche fluide plus dense que l'air ambiant.

Lorsque le processus est filmé à haute vitesse, il dévoile un phénomène bien connu des océanographes et des physiciens de l'atmosphère (voir la figure page 38, en bas). On reconnaît une instabilité, dite de Kelvin-Helmholtz, qui apparaît à la frontière entre deux fluides glissant l'un sur l'autre. Des ondulations se créent puis déferlent, un peu comme des vagues à la surface de l'océan.

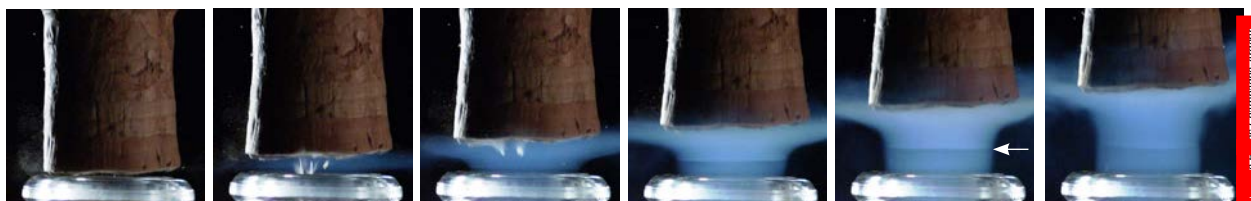
En météorologie, ces instabilités apparaissent parfois à la frontière entre les couches nuageuses et le ciel clair. En océanographie, on les retrouve lors de variations brutales de la densité de l'eau, par exemple à l'embouchure d'un fleuve, lorsque les eaux douces et peu denses se mélangent à l'eau de mer salée, plus dense. On les retrouve même en astrophysique. Par exemple, la structure en bandes de l'atmosphère de Jupiter, où soufflent des vents contraires atteignant plusieurs centaines de kilomètres par heure, est le siège de spectaculaires instabilités de Kelvin-Helmholtz.

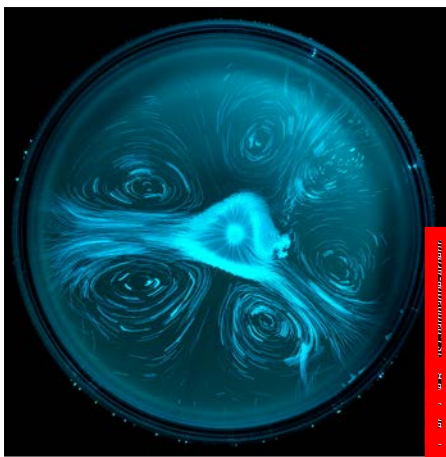
Laissons à présent le débouchage et la condensation qui s'ensuit pour contempler au sein du vin le ballet des bulles. En plus de leur rôle esthétique évident en dégustation, les bulles qui remontent dans le verre créent des tourbillons au cœur du liquide (voir les figures page 37 et ci-dessus). Ce processus, hélas invisible à l'œil nu, peut être mis en évidence par un procédé

UNE ONDE DE CHOC DANS LE NUAGE DE CONDENSATION

Lorsqu'on filme à une cadence plus rapide (12 000 images par seconde) le débouchage d'une bouteille de champagne conservée à température ambiante, des détails supplémentaires apparaissent. En particulier, on distingue

une onde de choc, parallèle au goulot [flèche], qui progresse de bas en haut dans le sillage du bouchon. Par ailleurs, les images mettent en évidence le retour très rapide du bouchon à sa forme d'équilibre.





LES TOURBILLONS QUI AGITENT LA SURFACE d'un verre de champagne (voir aussi l'illustration page 37) évoquent par leur aspect les systèmes tourbillonnaires des courants océaniques, reconstitués ici à l'aide de données satellitaires. Plus spécifiquement, à la surface du champagne, les tourbillons s'organisent en un nombre pair de cellules régulièrement disposées autour de l'axe central.

bien connu des physiciens : la tomographie laser. Cette technique consiste à éclairer le fluide avec un plan de lumière laser ; des particules ajoutées au fluide diffusent cette lumière et permettent ainsi de visualiser les mouvements du fluide dans ce plan.

Des tourbillons comme dans les océans

Les mouvements tourbillonnaires ont une importance considérable dans le champagne. Ils renouvellent en permanence la surface libre du liquide en composés volatils odoriférants, accélérant ainsi l'évaporation des arômes du vin. Ils sont donc responsables d'une perception plus efficace des arômes que le vin recèle.

Notons d'ailleurs que l'olfaction d'un vin tranquille (incapable de tourbillonner par lui-même) s'effectue toujours après l'avoir agité. En imprimant un mouvement de rotation à son verre, le dégustateur met le vin en rotation, permettant ainsi aux arômes de s'échapper plus rapidement. Dans le cas du champagne, cette agitation est inutile. L'effervescence joue ce rôle à merveille en faisant tourbillonner le champagne dans un verre au repos !

Prenons encore un peu de recul et embarquons à bord d'un satellite de la Nasa. Entre juin 2005 et décembre 2007,

dans le cadre du programme ECCO (*Estimating the Circulation and Climate of the Ocean*), la Nasa a synthétisé l'ensemble des données satellitaires portant sur la circulation océanique de surface. Le but ultime est de modéliser, à l'échelle planétaire, les mouvements des masses d'eau afin de les prendre en compte dans les modèles destinés à mieux cerner les futurs changements climatiques. Au-delà de l'avancée scientifique majeure que constitue ce programme pour la compréhension du fonctionnement de notre planète, le résultat visuel est éblouissant. Les images qui matérialisent les courants à la surface des océans sont d'une grande beauté graphique (voir la figure ci-dessus).

À l'échelle des océans, on retrouve des systèmes tourbillonnaires qui rappellent ceux qui agitent la surface du champagne. À la toute petite échelle d'une flûte de champagne, le fluide est mis en mouvement par la remontée des bulles et s'organise spontanément en de multiples cellules convectives, tout comme le font les courants océaniques à la surface du globe. Le microcosme de la flûte de champagne rejoint ainsi le macrocosme de la surface océanique ! L'infiniment petit de la flûte de champagne est une leçon sur l'infiniment grand qui nous entoure et dans lequel l'homme se retrouve plongé...

BIBLIOGRAPHIE

S. Liger-Belair et G. Polidori, *Nouveau voyage au cœur d'une bulle de champagne*, Odile Jacob, 2015.

S. Liger-Belair et al., *Champagne La vie secrète des bulles*, Le Cherche midi, 2015.

J. Beaumont et al., *Numerical modelling of bubble-driven flow patterns in champagne glasses*, *Int. J. of Num. Meth. for Heat and Fluid Flow*, vol. 24, pp. 563-578, 2014.

S. Liger-Belair et al., *Champagne cork popping revisited through high-speed infrared imaging: the role of temperature*, *Journal of Food Engineering*, vol. 116, pp. 78-85, 2013.

Détecter la lumière de toutes les étoiles disparues

Plusieurs générations d'étoiles, aujourd'hui éteintes,
ont empli l'Univers d'un rayonnement ambiant
que les astronomes commencent tout juste à détecter

Alberto Domínguez, Joel Primack et Trudy Bel



Pourquoi le ciel nocturne est-il si obscur ?

Après tout, si l'Univers est rempli de milliards de galaxies, constituées chacune de milliards d'étoiles qui émettent les photons depuis des milliards d'années, comment expliquer que l'Univers ne soit pas inondé de lumière ? L'astronome allemand Wilhelm Olbers se posait la question dans les années 1820, et cette énigme porte désormais le nom de « paradoxe d'Olbers ». En fait, cela faisait des siècles que les astronomes et les philosophes se demandaient pourquoi le ciel était si sombre, et ce que cette obscurité signifiait concernant la nature de l'Univers. Ces savants avaient mis le doigt sur une question bien plus profonde qu'ils ne l'imaginaient.

Le cosmos renferme bien plus de lumière que ce que nous pouvons voir. Même dans les profondeurs de l'espace, loin des lumières de la Terre et des étoiles de la Voie lactée, le milieu intergalactique n'est pas complètement noir. Il brille faiblement d'une lueur nommée fond diffus extragalactique (EBL pour *extragalactic background light*). Ce rayonnement comprend toute la lumière, depuis l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge, émise par l'ensemble des étoiles et des galaxies ayant jamais existé pendant l'histoire cosmique, de son commencement jusqu'à nos jours.

Ce fond diffus extragalactique est faible, car l'espace extragalactique est vaste comparé au nombre de galaxies qui y brillent (ou y ont brillé un jour). Et parce que l'Univers est en expansion, les photons émis par les galaxies se sont répartis dans un volume toujours plus immense et s'y sont dilués. En outre, cette expansion entraîne un décalage vers le rouge de la lumière des galaxies lointaines : la longueur d'onde de cette lumière a augmenté, c'est-à-dire que la lumière visible de ces galaxies est devenue de plus en plus rouge, puis a versé dans l'infrarouge, en dehors de la plage visible.

Les astronomes ont compris, depuis 1967, que ce fond de lumière extragalactique devait exister, et a été découvert par une équipe française en 1996 dans les données du satellite COBE, dans l'infrarouge lointain. La même équipe, à Orsay, a mesuré ce fond en 2006 avec le satellite *Spitzer* avec précision. Ces mesures montraient que l'EBL est principalement composé de lumière provenant de galaxies formant beaucoup d'étoiles masquées par de la poussière qui rayonne dans l'infrarouge lointain.

En revanche, l'EBL dans le domaine visible et proche infrarouge, émis directement

par les étoiles, était beaucoup plus difficile à mesurer. Des premières mesures utilisant des blazars provenant des télescopes HESS datent de 2005 et 2007. Entre 2012 et 2013, des chercheurs (dont deux d'entre nous, Alberto Domínguez et Joel Primack) sont parvenus à quantifier sans ambiguïté le fond extragalactique en utilisant des données portant sur les rayons gamma, enregistrées par le télescope spatial *Fermi* et par des détecteurs au sol – des télescopes d'imagerie Tcherenkov atmosphérique.

En plus du défi technique, ce rayonnement intéresse beaucoup les astrophysiciens parce qu'il préserve d'une certaine façon la « mémoire » de la formation stellaire aux différentes époques de l'histoire de l'Univers. En effet, les étoiles contribuent à l'essentiel du fond extragalactique, soit en émettant directement de la lumière, soit en chauffant la poussière du milieu interstellaire, qui rayonne alors à des longueurs d'onde plus grandes. Et de fait, les mesures du fond diffus extragalactique permettent d'explorer l'évolution des galaxies depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours. À terme, nous espérons étudier la toute première génération de galaxies, formée il y a plus de 13 milliards d'années, dont la lumière est trop faible pour être vue directement avec les télescopes actuels.

Fond cosmologique et fond extragalactique

Le paradoxe d'Olbers a été surtout une question philosophique jusque dans les années 1960. Grâce aux progrès techniques et à l'accumulation des découvertes astronomiques, la cosmologie a évolué du statut d'idées spéculatives à celui de science observationnelle rigoureuse. La vision de l'Univers s'est précisée et, en particulier, l'idée que l'espace était rempli d'un « gaz » dilué de photons filant à toute vitesse et en tous sens a germé. Ces photons devaient avoir des longueurs d'onde très variées, des informations intéressantes pour comprendre le cosmos. Il fallait concevoir des instruments pour mesurer des photons de différentes énergies. L'énergie d'un photon est liée à sa longueur d'onde : une longueur d'onde courte correspond à une onde de haute fréquence et donc de grande énergie ; inversement, une grande longueur d'onde est associée à une fréquence basse et une énergie faible.

Ce gaz de photons inclut le fond diffus extragalactique ainsi que d'autres types de

L'ESSENTIEL

Le ciel nocturne est sombre. Pourtant, il est rempli de la lumière accumulée de toutes les étoiles qui ont brillé au cours de l'histoire de l'Univers.

Ce fond diffus extragalactique est peu lumineux comparé aux objets proches et au fond diffus cosmologique.

Les astronomes ont mis au point une méthode pour détecter cette lumière en étudiant le rayonnement des galaxies lointaines nommées « blazars ».

Les chercheurs extraient des indices sur l'évolution des galaxies, les plus anciennes aux plus récentes.

rayonnement observables dans toutes les directions du ciel. Le plus brillant est le fond diffus cosmologique (qui se situe dans la gamme des micro-ondes). Il a été émis très tôt dans l'histoire de l'Univers, 380 000 ans après le Big Bang, et il fut observé pour la première fois en 1965 par Arno Penzias et Robert Wilson alors qu'ils travaillaient aux laboratoires AT&T Bell. Ils reçurent le prix Nobel de physique en 1978 pour cette découverte. Dans les années 1960, les chercheurs découvrent un fond diffus de rayons X extragalactiques au moyen de usées-sondes, puis un fond diffus de rayons gamma grâce à un observatoire spatial.

Une lumière trop discrète

Le fond diffus extragalactique (qui recouvre les longueurs d'onde du proche ultraviolet, du visible et de l'infrarouge) est deuxième en termes d'énergie et d'intensité derrière les micro-ondes du fond diffus cosmologique. Mais contrairement au fond diffus cosmologique, l'EBL n'a pas été produit d'un seul coup ; il augmente continûment depuis des milliards d'années, depuis la formation des premières étoiles dans les premières galaxies.

Il faut attendre environ 200 millions d'années après le Big Bang. L'EBL reçoit encore aujourd'hui de nouvelles contributions, puisque sans cesse de nouvelles étoiles naissent et se mettent à briller (voir l'encadré ci-dessous).

Si le fond diffus extragalactique est alimenté en permanence, il n'en reste pas moins difficile à observer. Le mesurer directement en recueillant ses photons avec un télescope reviendrait à essayer d'observer la Voie lactée en se plaçant au milieu de la place du Trocadéro, à Paris, avec toute l'éclairage public et la pollution lumineuse engendrée. La Terre se trouve à l'intérieur d'une galaxie très lumineuse renfermant des milliards d'étoiles et d'immenses nuages de gaz rougeoyant qui éclipsent le fond diffus extragalactique. Pire encore, au sein du Système solaire, la lumière du Soleil est diffusée par toute la poussière environnante. Cela constitue la lumière dite zodiacale, que l'on peut confondre avec l'aube à certaines périodes de l'année dans des sites épargnés par la pollution lumineuse. En outre, la lumière zodiacale brille dans les mêmes longueurs d'onde que l'EBL.

Comment les astronomes pouvaient-ils espérer un jour isoler, capter et identifier des photons du pâle EBL dans ces conditions ?

En fait, ils ne le peuvent pas. Les télescopes, dans l'espace comme au sol, ont échoué à mesurer directement et correctement l'EBL. En 2000, Piero Madau, de l'université de Californie à Santa Cruz, et Lucia Pozzetti, de l'observatoire astronomique de Bologne, ont proposé une façon indirecte d'en estimer l'intensité. Ils ont additionné la lumière des galaxies détectées par le télescope spatial *Hubble*. Cela incluait les galaxies brillantes et certaines galaxies pâles, invisibles pour les autres télescopes, mais omettait le reste de l'EBL (qui correspond à toute la lumière émise, des longueurs d'onde du proche ultraviolet à celles de l'infrarouge). Avec ce recensement, les chercheurs pouvaient donner une limite basse de l'intensité du fond EBL aux différentes longueurs d'onde.

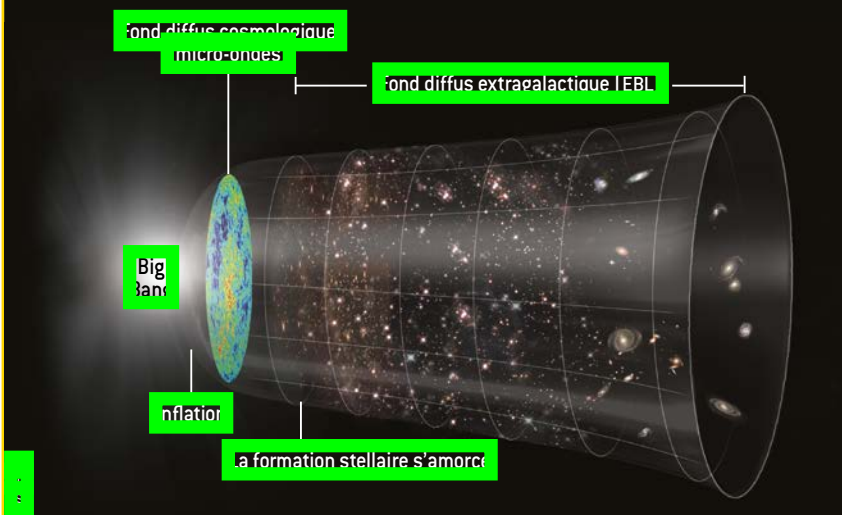
En 2011, Alberto Domínguez, Joel Primack et leurs collaborateurs ont amélioré ces limites en additionnant la quantité de lumière infrarouge et visible, observée par les télescopes au sol et dans l'espace, émise par les galaxies allant des plus proches à celles distantes de 8 milliards d'années-lumière (distance correspondant à un doublement de la longueur d'onde initiale de la lumière émise, soit un décalage vers le rouge égal à 1, dans les unités utilisées par les astrophysiciens).

Regarder très loin dans l'espace revient à regarder très loin dans le passé, puisque nous voyons les objets tels qu'ils étaient quand la lumière a été émise. Une distance de 8 milliards d'années-lumière correspond ainsi à un peu plus de la moitié de l'histoire de l'Univers (âgé de 13,8 milliards d'années). Les chercheurs ont mesuré les spectres de rayonnement – la répartition en longueurs d'onde – des galaxies situées à différentes distances, c'est-à-dire appartenant à différentes époques cosmiques. En les comparant, on évalue les variations du taux de formation d'étoiles dans les galaxies au cours de l'histoire de l'Univers, ce qui influe sur le fond diffus extragalactique. Le rayonnement provenant de galaxies plus anciennes a été estimé. Cette méthode a permis la meilleure détermination en date, à partir d'observations, du fond diffus extragalactique. Mais pour véritablement mesurer l'intensité lumineuse du fond extragalactique, les astronomes allaient devoir changer d'approche.

Dès les années 1960, les chercheurs ont envisagé de traquer l'EBL par l'intermédiaire de ses interactions avec d'autres formes de lumière plus faciles à détecter. Par exemple, quand un photon gamma de

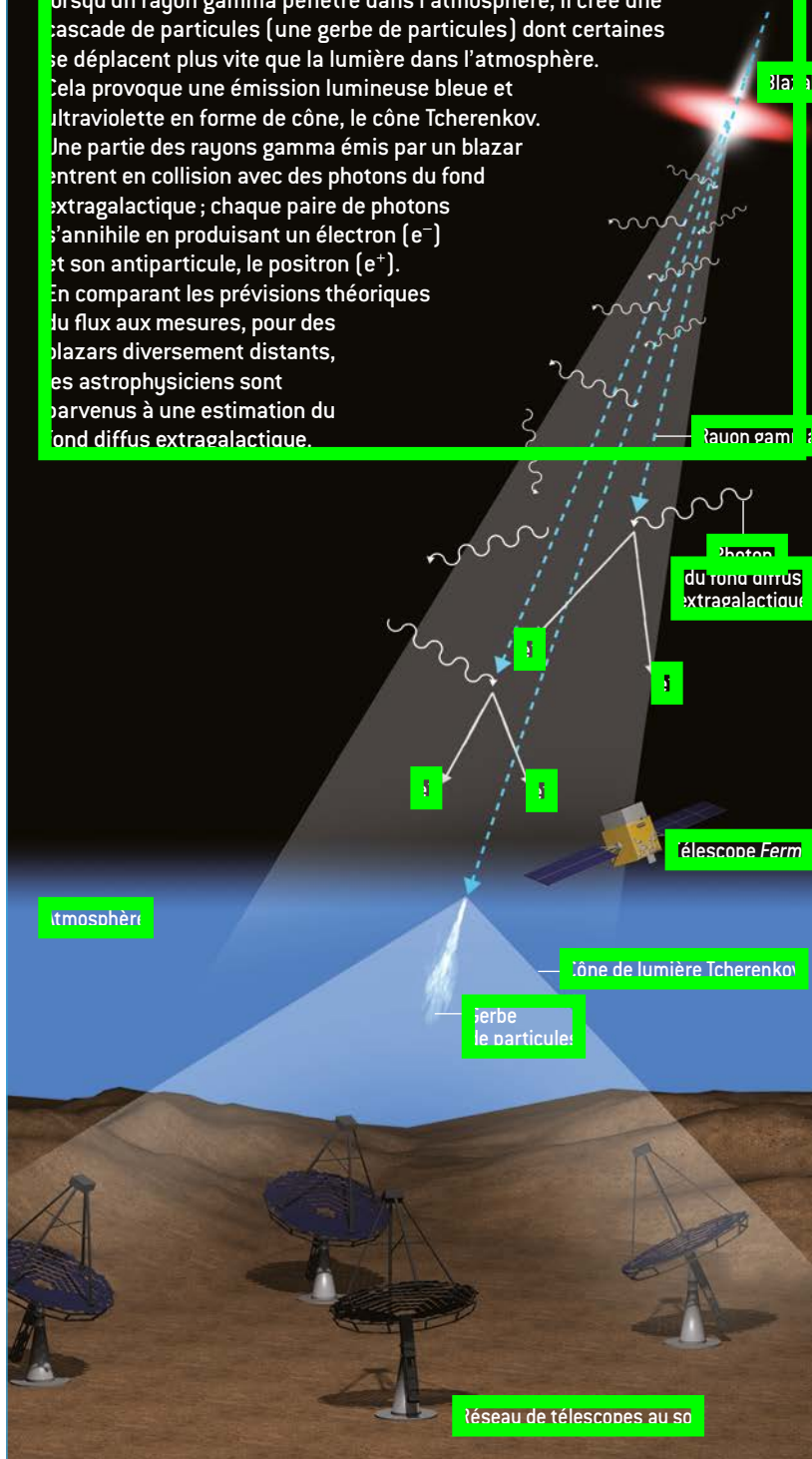
LE FOND DIFFUS EXTRAGALACTIQUE

Le fond diffus extragalactique [EBL] est constitué de la lumière de toutes les étoiles ayant jamais brillé. Ce rayonnement a commencé à s'accumuler à partir du moment où les premières étoiles se sont formées, environ 200 millions d'années après le Big Bang. De nouveaux astres y ajoutent en permanence leur contribution. Mais, parce que l'espace est si vaste (et parce qu'il est en expansion), cette lumière est faible et diffuse. Le fond diffus cosmologique [micro-ondes] est un autre rayonnement qui imprègne tout l'Univers. Contrairement à l'EBL, le fond diffus cosmologique ne croît pas avec le temps ; il a été émis une fois pour toutes environ 380 000 ans après le Big Bang.



LE LONG VOYAGE DE LA LUMIÈRE

La lumière du fond extragalactique est difficile à détecter directement parce qu'elle est plus faible que la lumière de premier plan du Système solaire et de la Voie lactée. Les astrophysiciens ont utilisé une méthode indirecte en mesurant le flux de rayons gamma (lignes pointillées) émis par des objets lointains tels que les blazars (des galaxies avec des trous noirs supermassifs qui émettent ces rayons gamma). Ces rayons gamma sont mesurés grâce à des télescopes spatiaux, tel *Fermi*, ou au sol, tels les télescopes à imagerie Tcherenkov atmosphérique. Dans ce dernier cas, lorsqu'un rayon gamma pénètre dans l'atmosphère, il crée une cascade de particules (une gerbe de particules) dont certaines se déplacent plus vite que la lumière dans l'atmosphère. Cela provoque une émission lumineuse bleue et ultraviolette en forme de cône, le cône Tcherenkov. Une partie des rayons gamma émis par un blazar entrent en collision avec des photons du fond extragalactique ; chaque paire de photons s'annihile en produisant un électron (e^-) et son antiparticule, le positron (e^+). En comparant les prévisions théoriques du flux aux mesures, pour des blazars diversement distants, les astrophysiciens sont parvenus à une estimation du fond diffus extragalactique.



haute énergie entre en collision avec un photon peu énergétique, comme ceux de la lumière visible, ils s'annihilent en créant un électron et son antiparticule, le positron. Plusieurs astronomes ont commencé à se demander ce qui se passerait si des rayons gamma de haute énergie issus de sources cosmologiques lointaines et se dirigeant vers la Terre entraient en collision avec des photons de l'EBL, de plus basse énergie. La luminosité apparente des rayons gamma serait affaiblie, amputée de la part qui se serait annihilée avec les photons de l'EBL. Si les scientifiques parvenaient à détecter une telle atténuation des rayons gamma, la composition du fond diffus extragalactique pourrait se révéler.

Des phares galactiques

Cette question est restée théorique jusqu'en 1992, quand le détecteur EGRET (*energetic gamma ray experiment telescope*), sensible aux rayons gamma et embarqué sur l'observatoire spatial *Compton* de la Nasa, découvre le premier objet d'une nouvelle classe de sources de rayons gamma qui allaient prendre le nom de blazars : des galaxies dotées d'un trou noir central supermassif qui émettent de puissants jets de rayons gamma qui, par chance, sont dirigés vers la Terre. Les rayons gamma de ces jets ont une énergie phénoménale de plusieurs milliards d'électronvolts (ou gigaélectronvolts). Certains blazars, tels que Markarian 421 (Mrk 421 en raccourci) émettent des rayons gamma d'énergie stupéfiante, atteignant 20 téraélectronvolts (milliers de gigaélectronvolts), soit des rayons environ 100 millions de fois plus énergétiques que les rayons X à usage médical.

Distant de quelque 400 millions d'années-lumière, le blazar Mrk 421 est relativement proche à l'échelle extragalactique. Mais sa découverte dans les années 1990 amena Joel Primack à se demander s'il existait des blazars beaucoup plus lointains et émettant des rayons gamma d'énergie comparable, qui seraient utiles pour détecter l'EBL. De fait, dans les années suivantes, de tels objets ont été découverts à des distances de plus en plus grandes.

A partir de 2006, Alberto Domínguez a alors cherché un moyen d'exploiter les blazars pour mesurer l'EBL, alors qu'il étudiait ces objets au moyen de l'observatoire de rayons gamma MAGIC. En 2012, il a signé, avec une équipe de cent cinquante personnes

sous la direction de Marco Ajello, maintenant à l'université de Clemson aux États-Unis, une étude qui présente la première mesure de la quantité de lumière issue d'un blazar, absorbée par l'EBL. Les chercheurs ont étudié les données du télescope spatial *Fermi*, en analysant les observations de cent cinquante blazars à des distances variées afin de mesurer dans quelles proportions leurs rayons gamma sont atténués en fonction de la distance, c'est-à-dire après avoir traversé différentes épaisseurs de l'EBL. Les observations s'étendent jusqu'à un décalage vers le rouge de 1,6, ce qui correspond à la lumière émise il y a presque 10 milliards d'années.

Pour affiner cette mesure, les astronomes ont besoin de mieux comprendre les blazars, et donc de savoir quelle quantité de rayons gamma de diverses énergies un blazar a produit avant que certains ne soient absorbés par des collisions avec les photons de l'EBL en traversant les milliards d'années-lumière de l'espace extragalactique.

La meilleure façon d'estimer l'émission d'un blazar est de combiner les modèles théoriques d'un tel objet (qui décrivent, en particulier, comment il produit des rayons gamma très énergétiques) avec les observations de blazars dans les domaines des rayons gamma de basse énergie et des rayons X, qui ne sont pas absorbés par le fond EBL aussi souvent.

On pense que, pour de nombreux blazars, les rayons gamma de haute énergie résultent d'un processus nommé diffusion synchrotron Compton auto-induite (ou diffusion SSC, pour l'anglais *synchrotron self-Compton scattering*). Dans le jet du blazar, un faisceau énergétique d'électrons et de positrons interagirait avec des champs magnétiques et émettrait des rayons X. Certains de ces rayons X interagiraient à leur tour avec les électrons du jet (diffusion par effet Compton), et l'énergie transmise par ces derniers transformerait les rayons X en rayons gamma. Les modèles SSC permettent ainsi de prédire l'intensité de l'émission des rayons gamma de haute énergie en utilisant les observations relatives aux rayons gamma de basse énergie.

En 2013, Alberto Domínguez, Joel Primack, Justin Finke, du Laboratoire de recherche de la marine des États-Unis,

Les astrophysiciens étudient la formation des galaxies et des étoiles à partir du fond diffus extragalactique

Francisco Prada, de l'Institut d'astrophysique d'Andalousie, et trois autres collègues ont réuni les données de quinze blazars situés à différentes distances cosmologiques, données recueillies par une demi-douzaine de sondes de la Nasa et plusieurs télescopes au sol sensibles à différentes gammes de longueurs d'onde. Ils ont comparé les résultats du télescope spatial à rayons gamma *Fermi* avec l'intensité des rayons X des mêmes blazars mesurés par les satellites *Chandra X-ray Observatory*, *Swift*, *Rossi X-ray Timing Explorer* et *XMM-Newton*, en complétant avec des mesures des observations au sol dans les domaines optique et radio.

A l'aide de ces données et des modèles SSC du flux sortant des blazars, ils ont calculé la luminosité originale, non atténuée, en rayons gamma émis aux plus grandes énergies par neuf des blazars. Ils ont alors comparé ces calculs aux mesures directes, par des télescopes au sol, de la lumière gamma atténuée effectivement reçue à la surface de la Terre en provenance de ces mêmes blazars. Ils ont ainsi estimé l'empreinte de l'EBL sur les rayons gamma des blazars.

Une nouvelle fenêtre s'ouvre sur le cosmos

La détection de l'EBL était un grand défi pour l'astronomie observationnelle : percevoir un signal si faible et diffus a nécessité de coordonner des télescopes et des chercheurs dans le monde entier pour réaliser des observations simultanées d'objets extrêmement lointains. Elle a offert l'occasion d'étudier l'histoire cosmique sous un angle inédit.

Tandis que, dans les années 1990, les astronomes se rendaient compte que les blazars pourraient servir à étudier l'EBL, Joel Primack et Donn MacMinn (alors étudiant à l'université de Californie à Santa Cruz) ont commencé à s'interroger sur la façon d'exploiter ces observations pour mieux comprendre l'évolution des galaxies. En effet, beaucoup de questions fondamentales restent en suspens : quelle est la prévalence des étoiles massives dans les galaxies à diverses étapes de leur développement, comment la poussière absorbe et réémet l'énergie aux longueurs d'onde les plus grandes, ou encore comment le rythme de

LES AUTEURS



Alberto DOMÍNGUEZ est postdoctorant au département de physique et d'astronomie de l'université

de Clemson, en Caroline du Sud, aux États-Unis.

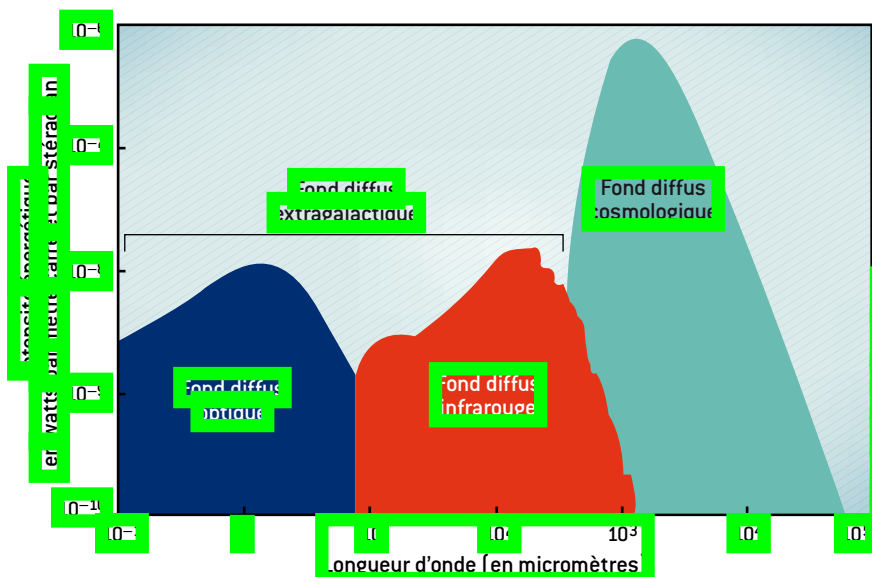


Joel PRIMACK est professeur émérite de physique à l'université de Californie

à Santa Cruz, aux États-Unis.



Rudy BELL, écrivaine et journaliste, a travaillé pour le magazine *Scientific American*



LE RAYONNEMENT QUI EMPLIT L'UNIVERS a diverses origines. Le plus important, le fond diffus cosmologique, a été émis 380 000 ans après le Big Bang. Le fond diffus extragalactique a deux composantes : une partie dans le domaine optique, émise directement par les étoiles, et une partie infrarouge, émise par la poussière interstellaire chauffée par des étoiles.

formation des étoiles dans les galaxies a varié au fil des époques de l'Univers, etc.

Les rayons gamma émis par les blazars traversent différentes épaisseurs de l'EBL, selon leur distance. Ils portent une certaine information sur le fond diffus extragalactique, qui aiderait à répondre à certaines de ces questions fondamentales en ouvrant des fenêtres sur différentes époques de formation stellaire.

Par exemple, nous savons que les galaxies lointaines de l'Univers primordial ont une physionomie bien différente de celle des galaxies proches : au lieu d'être des sphéroides réguliers ou de magnifiques spirales, elles sont compactes et difformes. Leurs formes distordues résultent en partie des collisions entre ces galaxies anciennes, fréquentes parce que l'Univers était plus dense dans sa jeunesse que maintenant. Les galaxies anciennes émettent également beaucoup plus de lumière infrarouge, en proportion, que les galaxies proches. Cela signifie que la lumière de l'EBL due aux galaxies anciennes très éloignées a un spectre différent de celui de la lumière EBL émise par des galaxies récentes et proches.

Les chercheurs examinent donc la répartition en énergie (le spectre) des rayons gamma absorbés par les photons de l'EBL. Le spectre des rayons gamma absorbés très loin dans l'espace (c'est-à-dire aussi très loin dans le temps) devrait être différent du spectre de ceux absorbés par les photons de l'EBL, plus proches. Dès 1994, Donn

MacMinn et Joel Primack ont modélisé la forme théorique de ces spectres. Ils en ont conclu que le facteur le plus important pour définir les caractéristiques de l'EBL est l'époque de formation galactique à laquelle les photons ont été émis. Sur la base de différentes hypothèses cosmologiques, ils ont déduit l'évolution au fil du temps de l'atténuation des rayons gamma par le fond diffus extragalactique. Ainsi, selon les mesures d'absorption des rayons gamma de sources diversement distantes, il sera possible de tester les théories concurrentes qui décrivent l'évolution des galaxies.

Avec les premières mesures du fond diffus extragalactique obtenues à partir de l'atténuation des blazars, les chercheurs ont commencé à brosser un tableau de la formation stellaire et galactique à travers l'histoire cosmique. Par exemple, le spectre de longueurs d'onde des mesures de l'EBL donne un aperçu de ce qui se passait au pic de formation stellaire, il y a 8 à 12 milliards d'années. Ce spectre présente deux bosses : l'une représente la lumière ultraviolette et visible issue d'étoiles, et l'autre correspond à la lumière infrarouge (voir la figure ci-contre).

Des indices de présence de la poussière

Cette seconde bosse semble être produite par de la poussière. Nous savons que les étoiles qui explosent produisent de la poussière (constituée d'éléments lourds tels que carbone, oxygène et fer), qui enveloppe et obscurcit les régions de formation stellaire. Au pic de formation des étoiles, la poussière absorbait une bonne partie de la lumière stellaire et la réémettait dans l'infrarouge. L'EBL fournit un moyen d'étudier la prévalence de ces galaxies obscurcies par la poussière à cette époque : c'est un élément important pour comprendre comment les planètes rocheuses telles que la Terre se sont formées, ces planètes contenant une grande quantité de poussière cosmique.

Ces résultats concrétisent plus de vingt années de recherche. Partis de l'idée qu'il était possible de « voir » la lumière émise par toutes les étoiles, actuelles ou passées, de l'Univers, nous avons aujourd'hui un outil pour étudier l'évolution de l'Univers au travers des caractéristiques du fond diffus extragalactique.

Jusqu'où pourrions-nous remonter dans le temps grâce aux recherches sur l'EBL ?

BIBLIOGRAPHIE

A. Domínguez et al., Detection of the cosmic gamma-ray horizon from multiwavelength observations of blazars, *Astrophysical Journal*, vol. 770(1), 77, 2013.

Collaboration Fermi, The imprint of the extragalactic background light in the gamma-ray spectra of blazars, *Science*, vol. 338, pp. 1190-1192, 2012.

H. Dole et al., Le fond infrarouge de galaxies livre ses secrets, 2008. <http://www.CNRS.fr/publications/imagesdelaphysique/uteurs2008/05/DLP.htm>

S. Hasinger et R. Gilli, Le grand inventaire cosmique, *Pour la Science*, n° 292 juillet 2002.

De futurs travaux pourraient nous apporter les informations sur des périodes encore plus anciennes de l'histoire de l'Univers. Si nous parvenons à étendre nos observations de l'EBL jusqu'à inclure quelques sources de rayons gamma à plus grand décalage vers le rouge, les astronomes pourraient étudier comment l'Univers a été réionisé au cours du premier milliard d'années après le Big Bang, la lumière ultraviolette des premières étoiles ayant ionisé les atomes neutres de la matière qui composait l'Univers en leur arrachant des électrons. Cet objectif est l'une des principales motivations du prochain télescope international CTA (*Cherenkov telescope array*, « réseau de télescopes Tcherenkov ») en cours de conception, avec des installations dans les hémisphères Nord et Sud, qui seront constitués de différents instruments conçus pour être sensibles aux rayons gamma, des plus basses énergies aux plus hautes.

Par ailleurs, une fois que nous comprendrons et quantifierons mieux l'EBL, nous pourrions soustraire son atténuation des observations de blazars et de sursauts gamma afin de décrire plus

complètement la nature de ces objets exotiques eux-mêmes.

En attendant, l'intensité de l'EBL mesurée indirectement par notre technique d'atténuation des rayons gamma est globalement compatible avec l'intensité de l'EBL estimée indépendamment à partir d'observations de galaxies d'époques plus anciennes. Cet accord signifie que la lumière émise par les galaxies aux longueurs d'onde des domaines optique et proche infrarouge semble expliquer les observations de l'EBL par l'intermédiaire de l'atténuation des rayons gamma. Un tel résultat nous conforte dans notre compréhension du fond diffus extragalactique et sur les conclusions que nous en tirons sur l'évolution des galaxies.

Regarder vers l'avenir

À mesure que nous affinerons nos mesures, l'accord entre les observations directes des galaxies et indirectes à partir des blazars pourrait être renforcé ou, au contraire, montrer des anomalies. Dans un cas, nous pourrions alors fixer des limites sur la présence dans l'Univers de sources de

lumière, telle la désintégration d'hypothétiques particules qui se seraient formées dans l'Univers primordial, et dans d'autre cas mettre en évidence de nouveaux phénomènes astrophysiques tels que la désintégration de particules exotiques se convertissant en rayons gamma. Les observations des rayons gamma seront grandement améliorées par la mise en service de CTA, mais c'est toute une nouvelle génération de télescopes spatiaux (le télescope *James Webb*), de télescopes au sol de plus de 30 mètres de diamètre, ainsi que le programme LSST (*Large synoptic survey telescope*) qui permettront de mieux comprendre la formation des galaxies.

Nous connaissons maintenant la réponse au paradoxe d'Olbers: le ciel nocturne n'est pas sombre; il est rempli de la lueur de toutes les galaxies qui ont existé depuis le commencement de l'Univers, même si cette lueur est difficile à détecter. Et en permanence, des supernovæ explosent, des nuages de gaz luisent et de nouvelles étoiles naissent, ajoutant leur lumière à ce fond omniprésent qui emplit chaque centimètre cube du cosmos. ■

En Janvier

Cerveau & Psycho

11 numéros par an au lieu de 6

devient mensuel

Toujours au cœur de la révolution cognitive
le nouveau Cerveau & Psycho

+ complet + attractif + rythmé

Et vous retrouverez toujours vos chroniqueurs préférés
Christophe André, Serge Tisseron, Sébastien Dieguez

www.cerveauetpsycho.fr

S'adapter à la

CYBER

Keren Elazar

Chaque appareil connecté est une cible potentielle pour les cybercriminels. Les gouvernements ne pourront sécuriser le cyberspace que si les particuliers sécurisent leurs propres équipements.

En termes de cybersécurité, aiment à dire les spécialistes, il existe deux types d'organisations : celles qui ont été touchées et celles qui ne le seront pas encore. Les récents titres de la presse tendent à leur donner raison. Des cybercriminels ont volé les informations des cartes de crédit et les données personnelles de milliers de clients de sociétés telles que les entreprises américaines Target et Home Depot (grande distribution) ou JPMorgan Chase (société de portefeuille). Les chercheurs en sécurité informatique ont découvert des failles fondamentales dans les constituants d'Internet, telle la vulnérabilité Heartbleed dans la bibliothèque de logiciels de cryptographie OpenSSL. Une destruction massive de données a obligé Sony Pictures Entertainment à

revenir au papier et au crayon. Des criminels ont accédé aux données de plus de 80 millions de clients de l'entreprise américaine d'assurance maladie Anthem. Et il ne s'agit que des incidents les plus connus.

Dans les années à venir, les cyberattaques vont probablement s'intensifier. Le problème nous concerne tous. Nous sommes tous, d'une façon ou d'une autre, connectés au cyberspace – *via* les téléphones, les ordinateurs portables, les réseaux d'entreprise –, et donc exposés. Le piratage des réseaux, serveurs, ordinateurs personnels et comptes en ligne est devenu une ressource essentielle tant des cybercriminels que des services d'espionnage des États. Votre réseau local d'entreprise, votre PC de jeu deviennent autant d'outils supplémentaires dans l'arsenal

des criminels – ou des cyberespions financés par le contribuable. Les ordinateurs compromis servent de tremplin pour l'attaque suivante ou deviennent les maillons d'un « botnet », un réseau malveillant de machines zombies contrôlées et louées à l'heure pour lancer des attaques par déni de service (qui rendent un service indisponible) ou distribuer des spams.

En réponse à de telles menaces, le réflexe des gouvernements consiste à militariser le cyberspace, à essayer de contrôler le monde numérique en s'appuyant sur des agences secrètes et des administrations centralisées. Mais cette approche ne fonctionnera jamais. Elle risque même d'empirer les choses. La cybersécurité est comme un problème de santé publique : seules, les agences de santé

GUERRE

gouvernementales n'ont pas les moyens d'arrêter la propagation des maladies. Elles ne peuvent remplir leur rôle que si les citoyens rempissent le leur.

Un cyberspace multiforme

Une difficulté pour protéger le cyberspace est que celui-ci n'est pas une entité unique. Le cyberspace est un vaste ensemble de systèmes interconnectés en perpétuelle mutation et croissance. Pour en prendre la mesure, il faut remonter un demi-siècle plus tôt, aux travaux de Norbert Wiener, professeur de mathématiques à l'Institut de technologie du Massachusetts. En 1948, Wiener a emprunté un terme du grec ancien pour décrire une nouvelle discipline qu'il développait : la cybernétique, ou l'étude du « contrôle et de la communication chez l'animal et la machine ». En grec ancien, κυβερνήτης désignait le timonier ou le pilote qui dirigeait et contrôlait les navires en Méditerranée. Par analogie, le cyberspace est l'ensemble des technologies électroniques et numériques interconnectées qui permettent le contrôle

et la communication de tous les systèmes sur lesquels repose la vie moderne. Le cyberspace est constitué d'un large éventail de technologies de commande à distance et de communication, allant des pompes à insuline pilotées par radiofréquences aux satellites de géolocalisation GPS.

Le cyberspace n'est pas une eau internationale. Il ne s'agit pas d'un ensemble de territoires que des gouvernements ou des armées pourraient contrôler. La plupart des technologies et réseaux qui constituent le cyberspace sont détenus et entretenus par des multinationales à but lucratif.

Le nombre et la diversité des technologies incluses dans cet espace croissent rapidement. Le fournisseur de matériel réseau Cisco Systems prédit que d'ici 2020, 50 milliards d'appareils seront connectés à internet, dont, pour une grande part, des dispositifs et systèmes liés à l'industrie, l'armée et l'aérospatiale. Chaque nouveau dispositif qui se connecte au cyberspace est une cible potentielle et les attaquants décèlent vite les maillons les plus faibles des réseaux. Les pirates qui se sont introduits en 2013 dans les terminaux de points de

L'ESSENTIEL

Les cyberattaques

se multiplieront dans les années à venir. Tout utilisateur des technologies modernes est une cible potentielle.

Les nouvelles attaques

visent certes les données, mais aussi les objets connectés et les infrastructures matérielles.

Seuls, les gouvernements

et l'industrie technologique ne peuvent sécuriser le cyberspace.

Avec l'aide des pirates informatiques et des particuliers, il faut construire un système « immunitaire » distribué

L'AUTEURE



Keren ELAZARI, spécialiste israélienne de la sécurité, est consultante en cybersécurité et

chercheuse associée du groupe de travail Science, sécurité et technologie de l'université de Tel Aviv.

SUR LE WEB

La conférence TED de Keren Elazari, *Who are the hackers ?*, 2014 : www.ted.com/playlists/10/who-are-the-hackers

La cybersécurité ne concerne pas seulement la sécurisation des ordinateurs, des réseaux ou des serveurs web

vente du distributeur américain Target et ont volé les données de millions de cartes bancaires, par exemple, ont pénétré dans le réseau du détaillant en s'attaquant d'abord à une cible facile : Fazio Mechanical Services, l'entreprise de maintenance frigorifique qui gère les systèmes de chauffage et de réfrigération de Target. Ceux qui, en 2011, ont accédé aux réseaux de l'entreprise américaine de défense Lockheed Martin s'en sont d'abord pris à la compagnie de sécurité RSA, qui fournissait à Lockheed Martin ses jetons d'authentification. RSA elle-même a été compromise parce qu'un employé de sa société mère, EMC, avait ouvert un fichier Excel attaché en pièce jointe à un courriel.

Les « objets » de l'Internet des objets – smartphones, tablettes, animaux marqués d'une puce... –, tous ces éléments auxquels l'internet s'étend aujourd'hui, ne sont pas simplement des fenêtres *via* lesquelles les attaquants peuvent s'infiltrer. Ils constituent eux-mêmes des cibles potentielles de sabotage. Dès 2008, des chercheurs en sécurité ont prouvé qu'il était possible de pirater à distance des stimulateurs cardiaques. Depuis, des hackers ont montré qu'ils étaient capables de prendre le contrôle de pompes à insuline au moyen de signaux radio et de déclencher l'injection d'insuline dans le système sanguin des patients.

Les infrastructures physiques sont aussi menacées. Le virus informatique Stuxnet l'a montré en 2010 en causant la destruction des centrifugeuses d'enrichissement de l'uranium au sein d'une installation clandestine à Natanz, en Iran. Fruit supposé d'une collaboration coûteuse entre les États-Unis et Israël, Stuxnet a révélé qu'un code numérique suffit à perturber et détruire des systèmes physiques ana-

logiques. Depuis, d'autres attaques l'ont confirmé. En décembre 2014, l'Office fédéral allemand de la sécurité des technologies de l'information a rapporté que des pirates avaient perturbé certains systèmes d'une aciérie, empêchant le haut-fourneau de s'arrêter et infligeant d'importants dégâts

au système. Trois mois plus tôt, des pirates chinois avaient attaqué les sites web de l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA) qui traitent des données satellitaires servant entre autres à l'aviation et à la réaction aux catastrophes.

En d'autres termes, la cybersécurité ne concerne pas seulement la sécurisation des ordinateurs, des réseaux ou des serveurs web. Il ne s'agit pas juste de sécuriser des « secrets » (comme si nous en avions encore beaucoup pour Google et Facebook !). La bataille du cyberspace concerne la protection des objets, des infrastructures et des processus. Le danger encouru est la subversion et le sabotage des technologies que nous utilisons tous les jours : nos automobiles, distributeurs bancaires et appareils médicaux ; nos réseaux électriques, satellites de communication et réseaux téléphoniques. La cybersécurité vise à protéger notre mode de vie.

Des vulnérabilités entretenues

Sécuriser le cyberspace confronte les gouvernements à des conflits profonds. De nombreuses agences fédérales, dont le Département de la sécurité intérieure des États-Unis, ont un réel intérêt à protéger les sociétés nationales et les citoyens des cyberattaques. Mais d'autres entités gouvernementales ont intérêt que le réseau mondial reste criblé de vulnérabilités. Des groupes clandestins tels que la NSA, l'Agence de sécurité américaine, investissent des millions pour trouver et maîtriser des failles techniques qui permettraient à un attaquant de prendre le contrôle d'un système.

La vulnérabilité de sécurité des uns est l'arme secrète des autres. Prenons le bug Heartbleed. Si vous avez utilisé Internet au cours des cinq dernières années, votre information a probablement été cryptée et décryptée par des ordinateurs équipés du logiciel OpenSSL. SSL est la technologie derrière les icônes en forme de cadenas qui signalent les sites web sécurisés. La vulnérabilité Heartbleed était le résultat d'une erreur élémentaire de développement logiciel dans Heartbeat, une des extensions d'OpenSSL, l'outil où le nom (voir l'encadré page 55). Exploitée, la faille donnait aux indiscrets un accès facile aux clés de chiffrement, noms d'utilisateurs et mots de passe, rendant illusoire toute sécurité offerte par le chiffrement SSL. OpenSSL a été vulnérable pendant deux ans avant que deux équipes distinctes de chercheurs



en sécurité (l'une dirigée par Neel Mehta, expert en sécurité chez Google, et l'autre de Codenomicon, dont le siège est en Finlande) ne découvrent le bug. Quelques jours plus tard, le magazine *Bloomberg Businessweek* citait des sources anonymes affirmant que la NSA utilisait cette faille depuis des années pour le cyberespionnage.

Nombre d'Etats puissants ont affecté leurs meilleurs techniciens et des millions d'euros à la découverte et à l'exploitation de vulnérabilités telles que Heartbleed. Les gouvernements achètent aussi des bugs sur le marché libre, contribuant à soutenir l'industrie des failles de sécurité. Un nombre croissant d'entreprises, telles que Vupen Security, à Montpellier, et Exodus Intelligence, à Austin, se spécialisent dans la découverte et la commercialisation de ces précieux bugs. Certains gouvernements dépensent même plus pour la recherche et le développement de capacités offensives que pour la défense contre les cyberattaques. Le Pentagone emploie nombre de chercheurs en vulnérabilités, et le budget de la NSA pour la cyberrecherche offensive est plus du double de celui consacré à la défense.

Cela ne signifie pas que les gouvernements ont des intentions malfaisantes ou qu'ils sont des ennemis de la cybersécurité. Les agences telles que la NSA recueillent

DEUX CYBERATTQUES qui ont marqué les esprits : le 24 novembre 2014, Sony Pictures Entertainment, filiale américaine du groupe japonais Sony, est piratée. De nombreuses données sont détruites, d'autres sont divulguées, notamment des films en postproduction. Quelques mois plus tôt, durant l'été 2014, des pirates ont volé les données personnelles de milliers de clients de la société américaine de portefeuille JP Morgan Chase.

les renseignements afin d'empêcher des actes abominables et il est logique qu'elles utilisent tout outil à leur disposition pour y parvenir. Toutefois, une étape importante de la sécurisation du cyberspace consistera à peser avec honnêteté les coûts et avantages de l'entretien des vulnérabilités par les agences gouvernementales. Une autre clé de la réussite sera de tirer le plein parti du pouvoir des gouvernements, qui peuvent par exemple obliger des entreprises et autres organismes à partager leurs informations sur les cyberattaques.

Les banques, en particulier, auraient tout intérêt à le faire, car les attaques sur les institutions financières suivent d'ordinaire un schéma prévisible : quand les criminels trouvent un angle d'attaque qui fonctionne avec une banque, ils l'essaient sur une autre, puis une autre... Toutefois, les banques évitent de divulguer des informations sur les attaques subies, car cela soulève des questions sur leur propre sécurité. Elles évitent aussi de communiquer avec leurs concurrentes ; dans certains cas même, les lois antitrust l'interdisent. Les gouvernements, en revanche, peuvent faciliter le partage d'informations entre banques. Ce partage est déjà mis en place aux États-Unis sous la forme du Centre de partage et d'analyse d'informations pour les services financiers (FS-ISAC), qui sert aussi les organismes financiers mondiaux. Et en février, Barack Obama a signé un décret présidentiel qui enjoint d'autres entreprises à partager leurs renseignements entre elles et avec le gouvernement.

Les pirates à la rescousse

Tant que les hommes écriront des programmes, des vulnérabilités existeront. Sous la pression concurrentielle, les entreprises du secteur des technologies introduisent leurs produits sur le marché plus vite qu'jamais. Ces entreprises seraient bien avisées d'exploiter l'énorme ressource humaine que constitue la communauté mondiale des hackers. Au cours de l'année passée, catalysées par des événements tels que les révélations d'Edward Snowden sur la NSA, l'industrie technologique et la communauté des hackers ont commencé à accepter l'idée de travailler ensemble. À présent, des centaines d'entreprises voient l'intérêt d'embaucher des hackers en les attirant au moyen de programmes qui récompensent la découverte de bugs ou de vulnérabilités

Aussi efficace soit-il, l'emploi de hackers n'est pas la seule façon d'éprouver la sécurité d'un système informatique. De plus en plus d'entreprises et

bonnes raisons. La meilleure est sans doute que, le plus souvent, les hackers ne peuvent trouver des vulnérabilités que parmi un catalogue d'attaques connues, certes vaste, mais fini.

Les méthodes formelles visent avant tout à prouver la sécurité d'un système informatique, elles consistent à modéliser tout ou partie d'un système informatique et à appliquer des algorithmes de vérification. Un tel algorithme prend en entrée le modèle conçu et une propriété de sécurité à vérifier, par exemple la confidentialité d'un message, et retourne une réponse oui (la propriété est vérifiée sur le modèle) ou non (une attaque est possible). La recherche d'une attaque est exhaustive : si une seule attaque existe contre la propriété dans le modèle, l'algorithme la trouvera.

Longtemps, les méthodes formelles ont semblé l'apanage de quelques chercheurs. Les industriels considéraient que les attaques trouvées étaient théoriques, c'est-à-dire inapplicables. C'est en train de changer, notamment pour la vérification des jetons de sécurité. Un jeton de sécurité est, typiquement, une clé USB qui fonctionne comme un coffre-fort pour vos clés secrètes. Vous la branchez dans votre ordinateur et, avec elle, vous pouvez vous authentifier et vous connecter à un site, chiffrer des documents confidentiels, déchiffrer ceux que l'on vous envoie. Vos clés secrètes ne sortent jamais du jeton : pour chiffrer un document, votre ordinateur l'envoie au jeton, qui le chiffre et le renvoie à l'ordinateur. Pour déchiffrer votre message,

le jeton et votre correspondant ont aussi besoin de la clé secrète utilisée. Il existe des moyens très malins pour fabriquer des clés secrètes communes à deux personnes et connues d'elles seules. Le protocole dit de

Diffie-Hellman en est l'exemple type, mais il est coûteux en temps. En pratique, on obtient une fois pour toutes une clé K' par ce moyen et, pour toutes les autres clés K à partager, on demande au jeton d'encapsuler K en la chiffrant avec K' . Le jeton de votre correspondant déchiffre alors le message encapsulé à l'aide de K' .

et obtient K . Ainsi, votre clé K est sortie de votre jeton de sécurité, mais elle n'a circulé que sous forme chiffrée. De nouveau, la sécurité est assurée... Du moins, c'est ce que l'on pourrait croire.

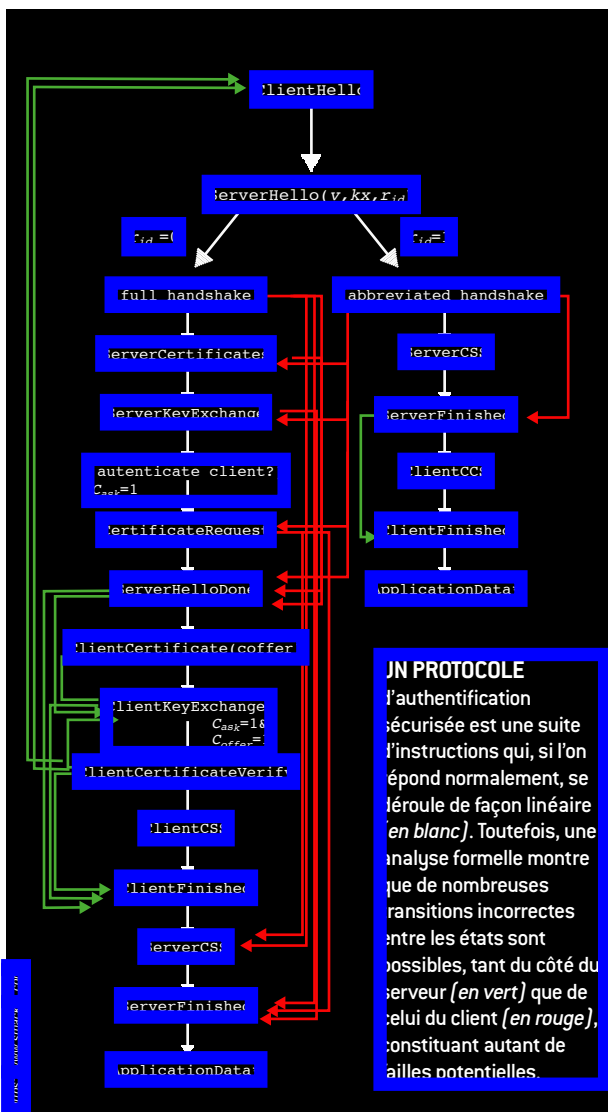
En 2003, un jeune chercheur de Cambridge, Jolyon Clulow, a découvert une attaque théorique contre les jetons de sécurité. Elle fonctionne en deux étapes. On demande d'abord au jeton d'encapsuler la clé K avec la clé K' . On obtient, hors du jeton, une suite de bits M qui est le résultat du chiffrement de K avec K' . Jusqu'à présent, rien d'utilisable. Mais si l'on demande au jeton de déchiffrer le message M avec la clé K' ,

comme si M était un message chiffré que l'on venait de recevoir d'un correspondant, le jeton renvoie le message déchiffré : la clé K , lisible en clair...

De nombreuses précautions ont été prises aujourd'hui pour éviter cette attaque, mais il y en a d'autres. Aussi, la jeune société française Cryptosense a développé un outil qui teste automatiquement votre jeton de sécurité via une méthode formelle, puis envoie un rapport de sécurité : pas de pirate à embaucher et une exhaustivité exceptionnelle dans la recherche d'attaques.

Autre exemple : la découverte en mars 2015 de l'attaque FREAK sur les protocoles sécurisés SSL/TLS. FREAK vous fait croire que vous disposez d'une connexion sécurisée avec des sites tels que Amazon ou PayPal, alors même que vous êtes connecté à un autre site, pirate. Même la NSA était vulnérable ! FREAK est une des attaques découvertes par des équipes communes à Inria et Microsoft, à l'aide de modèles fondés sur des machines à états des graphes tel celui ci-contre). Elles ont montré que les réalisations des protocoles faisaient bien davantage que ce qu'ils spécifiaient, et que ces possibilités supplémentaires étaient à l'avantage d'un attaquant.

Les méthodes formelles permettent d'assurer, sous certaines hypothèses, que votre système est sûr (s'il l'est). Notamment, la société française Prove&Run propose des solutions de sécurisation pour l'Internet des objets, les smartphones et tablettes, à destination des décideurs gouvernementaux ou des grandes entreprises qui ne peuvent se permettre d'être piratés. Ces solutions sont fondées sur des logiciels prouvés. Il faudrait un pirate bien malin pour les contourner.



UN PROTOCOLE d'authentification sécurisée est une suite d'instructions qui, si l'on répond normalement, se déroule de façon linéaire (en blanc). Toutefois, une analyse formelle montre que de nombreuses transitions incorrectes entre les états sont possibles, tant du côté du serveur (en vert) que de celui du client (en rouge), constituant autant de failles potentielles.

Jean Goubault-Larrecq
LSV, CNRS, ENS Cachan

les *bug bounty programs* ou *vulnerability reward programs*. Ces programmes offrent des primes aux chercheurs indépendants qui signalent des vulnérabilités ou des problèmes de sécurité. Netscape Communications a créé le premier programme de prime à la découverte de bugs en 1995 afin de repérer les éventuels défauts du navigateur Netscape. Aujourd'hui, vingt ans plus tard, la recherche a montré que cette stratégie est une des mesures les plus rentables que la société et sa successeuse, Mozilla, aient prises pour renforcer la sécurité. Les communautés privées et publiques de professionnels de la sécurité partagent leurs informations sur les logiciels malveillants, les menaces et les vulnérabilités. Elles créent ainsi une sorte de système immunitaire distribué.

A mesure que le cyberspace s'étend, constructeurs automobiles, entreprises de matériel médical, fournisseurs d'installations de cinéma à domicile et autres vont devoir raisonner comme des sociétés de cybersécurité. Cela suppose d'intégrer la sécurité dans la recherche et le développement, d'investir dans la sécurité des produits et des services dès la phase de conception, et non en fin de développement ou en réponse à des injonctions gouvernementales. Là encore, la communauté des hackers peut apporter sa contribution. En 2013, par exemple, les experts américains en sécurité Joshua Corman et Nicholas Percoco ont lancé le mouvement «I Am The Cavalry», pressant les pirates de s'engager dans une recherche responsable des failles de sécurité, notamment dans les domaines critiques tels que les infrastructures publiques, les équipements médicaux ou automobiles et les technologies domestiques connectées. Une autre initiative – BuildItSecure.ly –, à l'instigation des chercheurs en sécurité Mark Stanislav et Zach Lanier, vise à créer une plateforme pour développer des applications sécurisées de l'Internet des objets.

La bonne nouvelle est que ce système immunitaire distribué est de plus en plus solide. En janvier, Google a lancé un nouveau programme qui complète son programme de prime à la découverte de bugs, offrant des subventions pour encourager les chercheurs en sécurité à vérifier les produits de la compagnie. Cette décision montre que même des entreprises ayant recruté les meilleurs talents en technologie bénéficient du regard extérieur de pirates bien intentionnés. Certains gouvernements font de même. Ainsi, le Centre national néerlandais de

Le bug Heartbleed

Le 7 avril 2014, l'annonce de la faille Heartbleed dans la bibliothèque de cryptographie OpenSSL a soufflé un vent de panique chez les administrateurs systèmes. Durant deux ans, OpenSSL a présenté une vulnérabilité, introduite lors d'une amélioration. Il s'agit d'un bug d'implémentation. Heartbeat, une extension du protocole au cœur d'OpenSSL (SSL), récupère chez le client un message qui sert juste à vérifier que la connexion est active : il envoie un message basique au terminal client, qui lui répond. En utilisation normale, le message a deux parties : une suite d'octets et deux octets indiquant sa longueur. Mais dans Heartbleed, la longueur indiquée était bien plus grande que celle de la suite. En retour, le terminal client répondait un message de même longueur contenant la suite d'octets, comme en temps normal, mais aussi les octets suivants dans la mémoire, jusqu'à la longueur indiquée : avec de la chance, les identifiants utilisés...

BIBLIOGRAPHIE

K. Zetter, Countdown to Zero Day : Stuxnet and the Launch of the World's First Digital Weapon, Crown, 2014.

J. Healey [ed.], A Fierce Domain : Conflict in Cyberspace, 1986 to 2012, Cyber Conflict Studies Association, 2013.

Ère d'Internet, Dossier Pour la Science, n° 66, janvier-mars 2010.

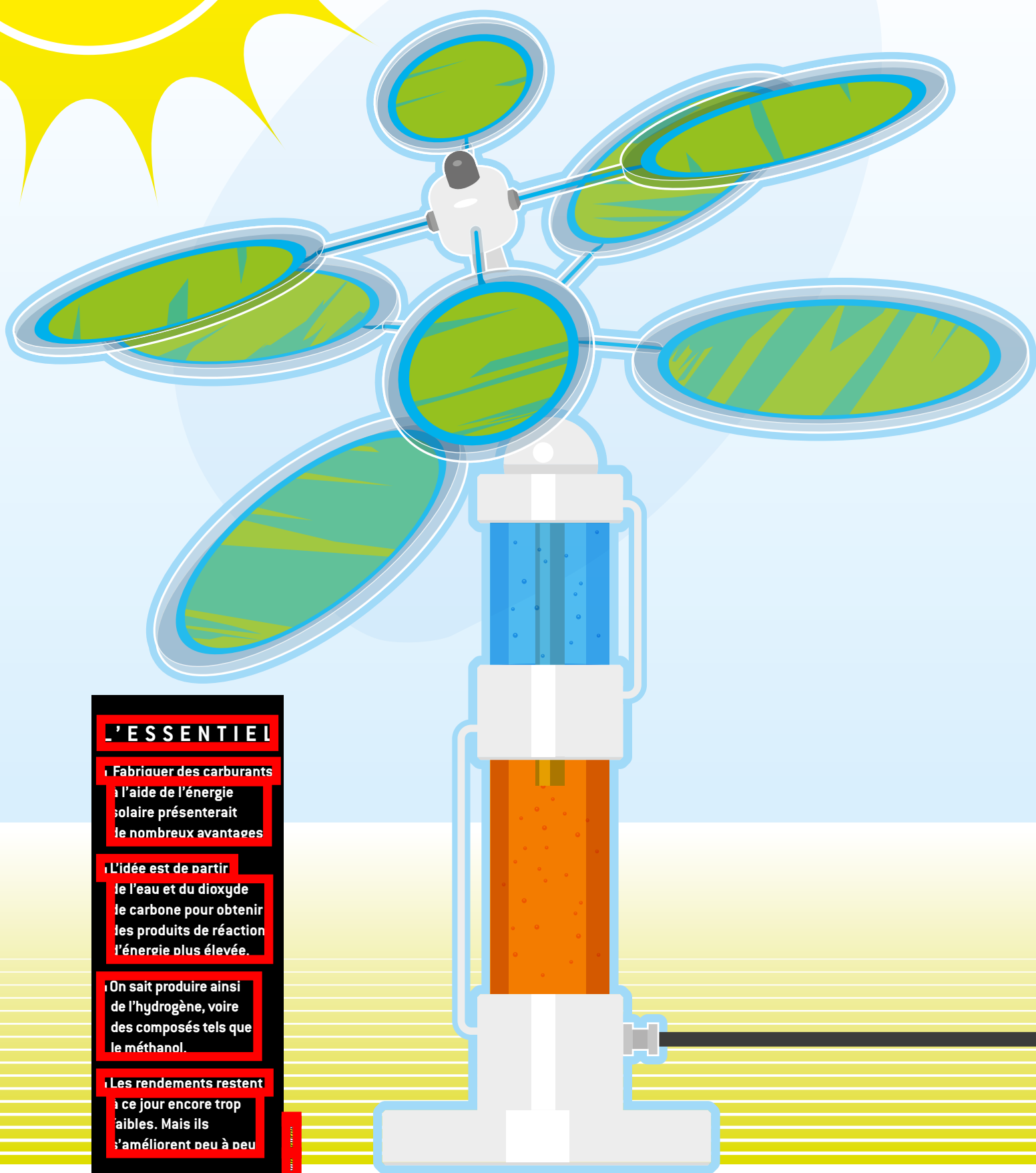
cybersécurité a établi son propre programme de divulgation responsable, qui permet aux pirates de signaler des vulnérabilités sans risque de représailles juridiques.

Aux États-Unis, la mauvaise nouvelle est que certains éléments de l'approche cyber-sécuritaire du gouvernement pourraient de facto criminaliser les pratiques et les outils classiques de la recherche de vulnérabilités, ce qui affaiblirait le système immunitaire. Beaucoup d'acteurs de la sécurité craignent que la version actuelle de la loi *Computer Fraud and Abuse* (Fraude et malveillance informatiques) et les modifications proposées donnent une définition si large du piratage que le simple fait de cliquer sur un lien vers un site web contenant des fuites ou des informations volées soit considéré comme du trafic de biens volés. Cette criminalisation du travail des chercheurs indépendants nous ferait du tort à tous et aurait peu d'effet sur les criminels mus par le profit ou l'idéologie.

Quelques règles de cyberhygiène

Les prochaines années pourraient être critiques. Le nombre de violations de données va augmenter et un ardent débat aura certainement lieu pour savoir quel pouvoir sur le monde numérique céder aux gouvernements en échange de sécurité. En fait, on ne pourra sécuriser le cyberspace sans combiner des solutions de diverses natures : techniques, légales, économiques et politiques. Et cela dépend aussi de nous, le grand public. En tant que consommateurs, nous devrions exiger que les entreprises rendent leurs produits plus sûrs. En tant que citoyens, nous devrions tenir nos gouvernements pour responsables quand ils affaiblissent volontairement la sécurité. Et en tant que points individuels de failles potentielles, nous avons la responsabilité de sécuriser nos installations.

Pour se défendre, il existe des mesures simples, telles que mettre à jour nos logiciels, utiliser des sites Web sécurisés et activer l'authentification à deux facteurs sur nos comptes de courriel et de réseaux sociaux. Mais cela suppose aussi d'être conscient que chacun de nos appareils est un nœud d'un vaste système et que les choix que nous faisons à notre petite échelle peuvent avoir des effets bien plus importants. La cybersécurité est comme la santé publique. Lavez-vous les mains, vaccinez-vous, et vous ne transmettez pas les infections. ■



L'ESSENTIEL

Fabriquer des carburants à l'aide de l'énergie solaire présenterait de nombreux avantages.

L'idée est de partir de l'eau et du dioxyde de carbone pour obtenir des produits de réaction à l'énergie plus élevée.

On sait produire ainsi de l'hydrogène, voire des composés tels que le méthanol.

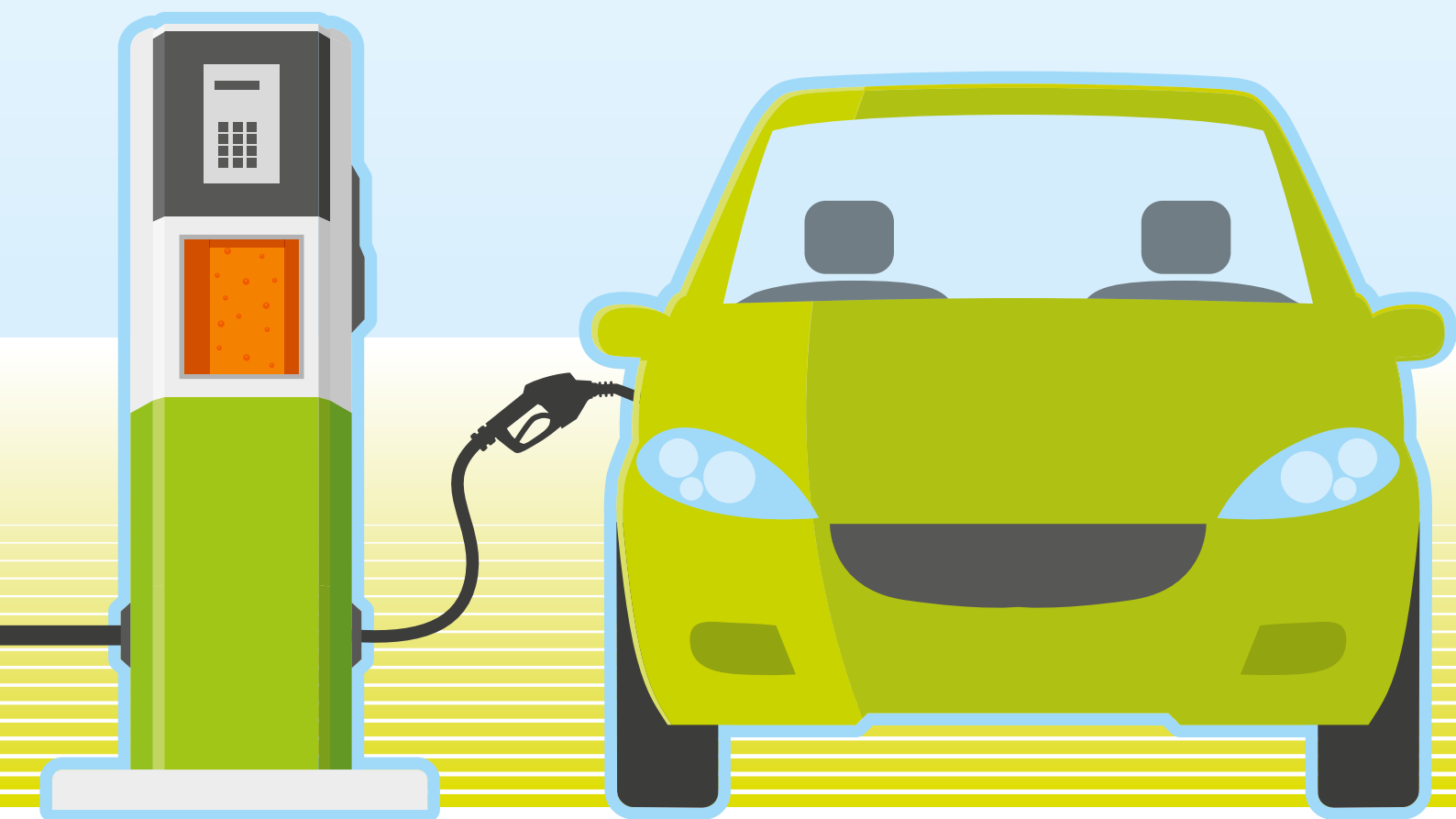
Les rendements restent à ce jour encore trop faibles. Mais ils s'améliorent peu à peu.

DES CARBURANTS SOLAIRES

pour la transition énergétique

Antoine Fécant et Hervé Toulhoat

En recueillant le rayonnement du Soleil, il est possible de synthétiser des carburants à partir d'eau et de dioxyde de carbone. Les rendements de ces procédés de photosynthèse artificielle s'améliorent peu à peu.



LES AUTEURS



Antoine FECANT est ingénieur de recherche et chef de projet à la Direction catalyse et séparation d'IFPEN (IFP Énergies nouvelles), Solaize.

Hervé TOULHOAT est directeur adjoint de la Direction scientifique d'IFPEN, Rueil-Malmaison.

En ces temps où les questions de transition énergétique, de réchauffement climatique et de préservation de l'environnement sont parmi les grandes préoccupations internationales, l'utilisation de l'énergie solaire apparaît avec l'évidence comme une voie à développer. L'exploitation directe par l'homme de cette énergie revêt aujourd'hui deux principales formes : d'une part, les procédés photovoltaïques, où le rayonnement solaire est capté et transformé en électricité ; d'autre part, les procédés photothermiques, où ce rayonnement est transformé en chaleur, à l'exemple des chauffe-eau solaires domestiques, très répandus dans certains pays.

Une troisième forme d'exploitation directe de l'énergie solaire est prometteuse et fait l'objet de recherches actives : la transformation de cette énergie en énergie chimique, les photons du Soleil servant à déclencher des réactions chimiques qui produisent des carburants. Les végétaux appliquent le principe depuis leurs débuts sur Terre, au moyen de la photosynthèse. Aussi qualifie-t-on parfois de photosynthèse artificielle la synthèse de carburants par des procédés photochimiques mis au point par l'homme.

Quel est l'intérêt de fabriquer de tels « carburants solaires » ? Quelques chiffres seront utiles pour le comprendre. Le flux d'énergie qui nous parvient de notre étoile est gigantesque. L'énergie solaire absorbée

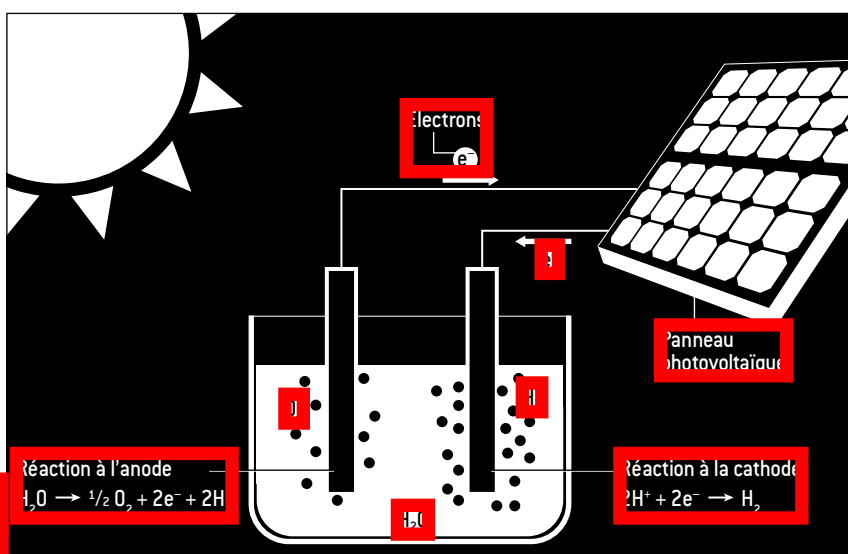
par la Terre est de l'ordre du milliard de térawattheures (1 TWh = 10⁹ kilowattheures, ou kWh) par an. Ce chiffre est très supérieur à la consommation d'énergie de l'humanité, estimée à environ 150 000 TWh par an, dont près de 21 000 TWh sous forme d'électricité.

L'énergie solaire est certes abondante et renouvelable aux échelles de temps qui nous sont pertinentes, mais elle est dispersée : en moyenne, chaque mètre carré de la surface terrestre reçoit une puissance de 170 watts. Elle est en outre intermittente en raison des saisons, de l'alternance jour-nuit et des aléas météorologiques, et elle est inégalement répartie en latitude.

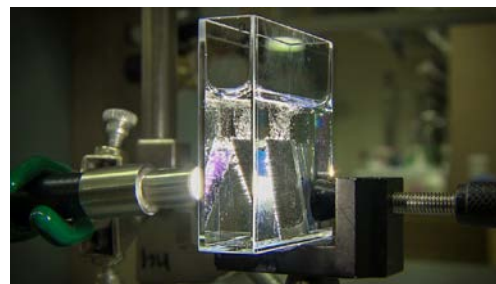
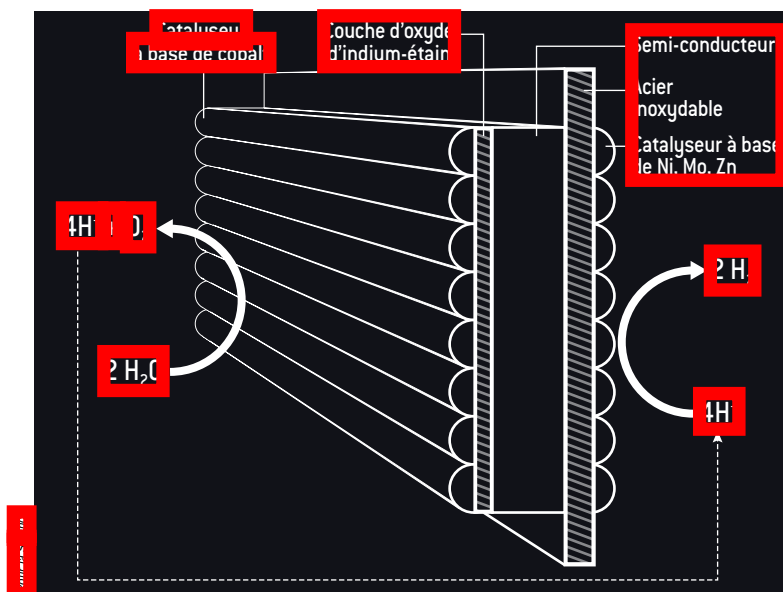
Une bonne forme de stockage de l'énergie

Pour pallier l'intermittence de l'énergie solaire, il faudrait stocker massivement l'énergie en laquelle on la transforme. Il s'agit là d'un défi qui se pose aussi pour l'énergie éolienne et qui mobilise beaucoup d'efforts de recherche et développement. Or les carburants constituent une forme de stockage chimique de l'énergie dont les avantages sont multiples. D'une part, ils sont facilement convertibles en énergie électrique, soit directement en alimentant des piles à combustible, soit indirectement en faisant tourner des turbines ou des moteurs à combustion interne. D'autre part, les carburants ont une très bonne densité de stockage (beaucoup d'énergie dans un petit volume et une faible masse), disposent d'un réseau de distribution bien développé et, pour ces deux raisons, conviennent aux utilisations mobiles – transports terrestre, aérien et maritime, informatique nomade, etc.

Comment fabriquer des carburants à partir du rayonnement solaire ? Nous nous limiterons ici aux stratégies non biologiques (quoique plus ou moins biomimétiques), à distinguer par exemple de la production de « biocarburants » à partir d'algues ou d'autres végétaux. Ces voies de photosynthèse artificielle mettent en œuvre l'eau (H₂O) et le dioxyde de carbone (CO₂), réactifs ayant de bas niveaux d'énergie, pour aboutir, en moissonnant l'énergie des photons solaires, à des produits de niveau d'énergie moyen ou plus élevé. Les produits de ces réactions photochimiques sont un carburant (ou plus précisément un combustible), à savoir de l'hydrogène (H₂) ou des composés organiques de formule C_xH_yO_z, et un comburant, le dioxygène (O₂).



UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE permet de produire de l'hydrogène (H₂) par électrolyse de l'eau : le panneau convertit le rayonnement solaire en électricité, laquelle assure, via deux électrodes plongées dans l'eau, la dissociation de l'eau en oxygène (O₂) et en hydrogène.

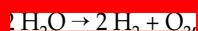


LA « FEUILLE ARTIFICIELLE » réalisée en 2011 par l'équipe de Daniel Nocera au MIT met en œuvre une couche semi-conductrice recouverte de part et d'autre de catalyseurs appropriés et immergée dans l'eau. Du côté éclairé [catalyseur à base de cobalt], l'eau se dissocie et produit des bulles d'oxygène [O₂]. De l'autre côté de la « feuille », des ions H⁺ se recombinent avec les électrons pour donner de l'hydrogène (H₂), dégagé sous forme de bulles. Ci-dessus, une photographie d'une « feuille » dégageant des bulles d'oxygène et d'hydrogène dans un récipient transparent.

Plus spécifiquement, nous examinons deux voies : d'une part la production d'hydrogène par dissociation de l'eau, d'autre part la réduction du CO₂ en combustibles oxygénés simples (l'acide formique HCOOH ou le méthanol CH₃OH), ou en hydrocarbures tels que le méthane (CH₄) et les alcanes légers (C_nH_{2n+1}).

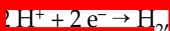
Dissocier les molécules d'eau

Commençons par la production d'hydrogène. Le dihydrogène, H₂, est le plus simple des carburants solaires qu'il soit possible d'obtenir à partir d'une matière première abondante, l'eau. La réaction de dissociation de l'eau,



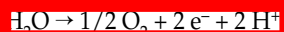
nécessite un apport d'énergie. Pour ce faire, l'électrolyse est le procédé le plus connu.

À la cathode de la cellule d'électrolyse, qui est l'électrode reliée au pôle négatif du générateur électrique (un panneau photovoltaïque si l'on exploite l'énergie solaire), se déroule la « demi-réaction » :



où e⁻ représente un électron

À l'anode (reliée au pôle positif), se déroule la demi-réaction complémentaire :



Les produits gazeux H₂ et O₂ se dégagent séparément aux deux électrodes sous la forme de bulles, que l'on peut capter et stocker.

Le rendement énergétique d'une cellule d'électrolyse réelle (rapport entre l'énergie

chimique récupérée et l'énergie électrique fournie) ne dépasse pas 70 %, en raison des surtensions qu'il est nécessaire d'appliquer pour franchir les barrières d'activation cinétique des réactions élémentaires.

En effet, le passage des réactifs aux produits se déroule selon un processus qui, sur le plan énergétique, passe par un état intermédiaire dont l'énergie est supérieure à celles de l'état initial et de l'état final.

Pour abaisser ces barrières et ainsi diminuer l'énergie à fournir, on joue sur les conditions opératoires (composition de l'électrolyte, température, pression) et sur la présence de catalyseurs à la surface des électrodes. Les catalyseurs

les plus efficaces connus sont le platine pour la cathode et l'iridium (ou plutôt le dioxyde d'iridium, IrO₂) pour l'anode. Ces deux métaux ont l'inconvénient d'être rares et coûteux. Une production massive d'hydrogène par électrolyse de l'eau avec ces catalyseurs n'est donc pas réaliste. C'est pourquoi de nombreux efforts dans le monde sont consacrés à la recherche de catalyseurs presque aussi efficaces, mais fondés sur des éléments plus abondants (fer, cuivre, nickel, cobalt, manganèse...).

Dans le dispositif d'électrolyse que nous venons de décrire, l'énergie utilisée par la cellule est électrique. Mais il existe d'autres procédés, dits photochimiques, qui utilisent directement les photons, au moyen de photoélectrodes ou de photo-catalyseurs en suspension.

Ainsi, dans une cellule de photoélectrolyse, la lumière, solaire par exemple, éclaire directement l'anode baignant dans l'électrolyte. Cette anode est plus précisément une photoanode, constituée d'un matériau semi-conducteur tel que le dioxyde de titane.

Dans un semi-conducteur, les niveaux d'énergie autorisés pour les électrons sont groupés en bandes. La dernière bande

L'hydrogène gazeux, le plus simple des carburants solaires, peut être obtenu par électrolyse de l'eau

saturée d'électrons, c'est-à-dire dont tous les niveaux sont occupés, est la « bande de valence » ; ses électrons ne sont pas mobiles. Mais s'il absorbe un photon d'énergie suffisante, un électron de la bande de valence peut passer dans la bande d'énergie au-dessus, la « bande de conduction », où il devient mobile. L'éclairement de la photoanode crée donc une différence d'énergie potentielle entre elle et la cathode métallique, qui permet de faire circuler les électrons dans le circuit extérieur relié à ces électrodes et ainsi d'activer les réactions d'électrolyse.

En principe, l'atout de la photoélectrolyse est la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie chimique, alors que pour l'électrolyse, il faut ajouter une cellule photovoltaïque (un panneau solaire). Mais

es grands progrès réalisés ces dernières années dans le domaine photovoltaïque, avec des rendements énergétiques dépassant désormais les 20 %, tendent à donner l'avantage à cette dernière solution.

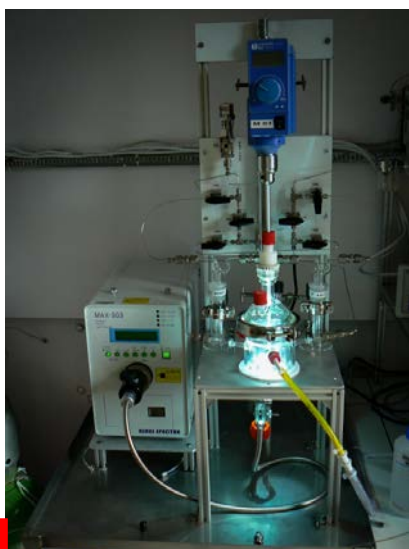
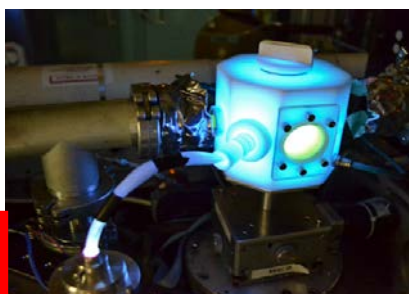
Des feuilles artificielles

Néanmoins, des preuves spectaculaires du concept de photoélectrolyse ont été présentées récemment. Un exemple est la « feuille artificielle » conçue en 2011 par l'équipe de Daniel Nocera, au MIT (Massachusetts Institute of Technology). Ce dispositif combine une couche jouant le rôle de photoanode et une autre faisant office de cathode, associées à des catalyseurs à base de nickel, zinc et molybdène, les deux couches étant séparées par une couche semi-conductrice (voir la figure page 59). Éclairée par de la lumière solaire et immergée dans de l'eau non purifiée, cette feuille artificielle produit d'un côté de l'hydrogène (H_2) et de l'autre de l'oxygène (O_2), avec un rendement énergétique de l'ordre de 5 %.

Pour un système combinant un panneau photovoltaïque et l'électrolyseur, le rendement global ne dépasserait pas 12 %. De plus, on estime que le coût associé de production de l'hydrogène avoisinerait alors 7 dollars par kilogramme, tandis qu'un kilogramme d'hydrogène obtenu par « feuille artificielle » reviendrait à 6,50 dollars par kilogramme. Les deux solutions évoquées ici sont donc au coude-à-coude. Mais ce coût est encore trop important, sachant qu'à partir de combustibles fossiles, la production d'hydrogène ne revient qu'à 1 ou 2 dollars par kilogramme.

Une fois produit, l'hydrogène doit être comprimé pour être stocké sous forme gazeuse, voire liquide, ou encore sous forme d'hydrures solides, technologie d'ores et déjà industrialisée en France par la société McPhy Energy. Bien entendu, l'énergie de compression à fournir réduit (de 20 à 40 %) le rendement énergétique global.

Le carburant qu'est l'hydrogène peut ensuite restituer son énergie par combustion, c'est-à-dire la réaction inverse de la dissociation de l'eau. L'eau produite est certes un gaz à effet de serre, mais elle est condensable et déjà à saturation dans l'atmosphère (il pleut souvent...), de sorte qu'une production d'eau par combustion n'aura pas d'effet sensible sur le bilan radiatif de l'atmosphère et, par conséquent, sur



CE DISPOSITIF EXPERIMENTAL est utilisé à l'IFPEN pour la production photo-assistée d'hydrogène (H_2) ou la conversion de CO_2 . Le cliché du haut montre une cellule permettant de caractériser, par absorption de rayons X émis par un synchrotron, les photocatalyseurs de dissociation de l'eau

le climat. La combustion peut s'effectuer dans un moteur à combustion interne, analogue à ceux qui équipent la plupart des véhicules terrestres aujourd'hui, avec un rendement énergétique de 40 % au mieux, ou dans une turbine à gaz, dont le rendement peut atteindre 35 %, ou encore dans une pile à combustible, dont le rendement va jusqu'à 80 %.

Dans une pile à combustible, l'énergie chimique est restituée sous forme de force électromotrice, le dispositif étant en quelque sorte l'inverse d'une cellule d'électrolyse. Et pour être efficaces, les réactions se déroulant aux électrodes (oxydation d'hydrogène gazeux en protons H^+ à l'anode et réduction de l'oxygène en eau à la cathode) nécessitent, comme pour l'électrolyse, des catalyseurs.

Produire des carburants à partir de CO_2

Pour être déployé à grande échelle, un carburant doit aussi se prêter facilement au transport, notamment en termes d'encombrement. De ce point de vue, les carburants liquides dans les conditions ordinaires de température et pression sont les plus adaptés. En effet, la densité d'énergie d'un carburant de type essence ou diesel se situe entre 1000 et 8000 kilowattheures par mètre cube (kWh/m^3), alors que dans les conditions usuelles, le dihydrogène H_2 produit seulement $3 kWh/m^3$ (bien qu'il soit le carburant le plus énergétique en masse). Même liquide ou comprimé à 700 bars, le dihydrogène a une densité énergétique ne dépassant pas $2800 kWh/m^3$, comme les composés hydrogénocarbonés ($C_xH_yO_z$) liquides les moins énergétiques, l'acide formique : $1200 kWh/m^3$; méthanol : $1500 kWh/m^3$, avec les problématiques de stockage et de sécurité en plus...

Les carburants classiques, issus des hydrocarbures fossiles, ont ainsi un avantage intrinsèque important en termes d'efficacité et donc de compétitivité. La véritable révolution pourrait alors résider dans des moyens nouveaux d'obtenir ces carburants. Et pour répondre aux attentes environnementales, il est indispensable que cela s'insère parfaitement dans un cycle fermé du carbone, c'est-à-dire en recyclant le CO_2 émis lors de toute combustion de produits carbonés.

Or la valorisation énergétique du CO_2 en carburant requiert un apport en énergie primaire. Cette énergie peut être chimique,

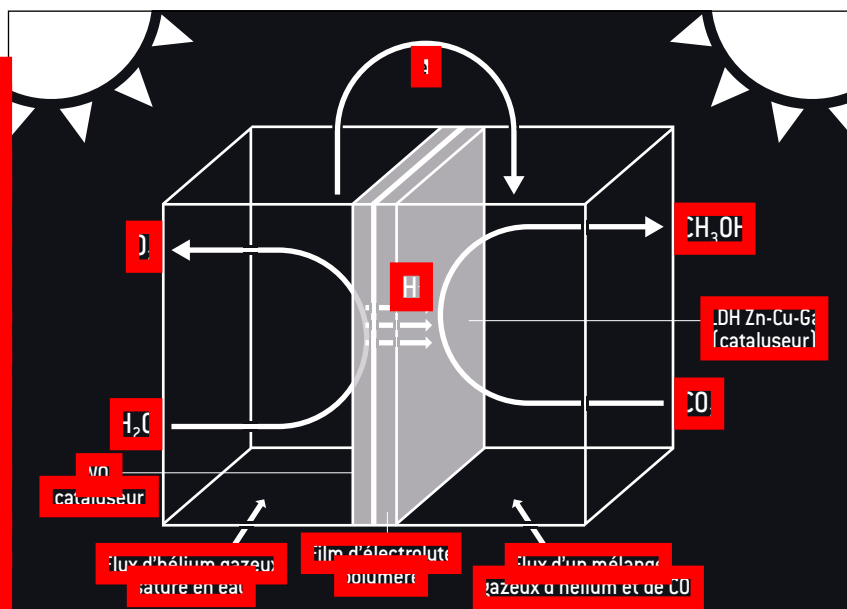
électrique ou photonique (conversion photochimique – ou plutôt photocatalysée – par irradiation solaire directe). Quelle que soit la source primaire d'énergie utilisée pour convertir le CO_2 en carburant, il y aura des pertes, qui accompagnent toute transformation par des procédés industriels. Par conséquent, la valorisation énergétique du CO_2 en carburant ne prend sens que si l'on utilise une source d'énergie abondante, décarbonée et bon marché. L'énergie solaire apparaît comme la seule qui répond parfaitement à ce bref et non exhaustif cahier des charges.

Toute combustion de composés hydrocarbonés en présence de dioxygène produit du CO_2 , de la vapeur d'eau et de l'énergie thermique. La réaction inverse, du CO_2 aux composés hydrocarbonés, est possible si l'on fournit au système assez d'énergie. C'est précisément le processus de photosynthèse naturelle qui s'opère dans les cellules chlorophylliennes des végétaux, où le CO_2 et l'eau sont transformés, grâce à l'absorption de photons du Soleil, en composés hydrogénécarbonés et en dioxygène. Dès lors, on pourrait se dire qu'il suffit d'exploiter la biomasse pour produire des biocarburants, puisque la nature a déjà fait le travail ! Mais deux raisons principales s'y opposent.

La photosynthèse naturelle est peu efficace

D'une part, peu de moteurs acceptent des bûches ou des brindilles directement en tant que carburant, et plusieurs étapes de transformation sont nécessaires pour obtenir un produit énergétique utilisable. De surcroît, les scientifiques s'interrogent beaucoup aujourd'hui sur la possibilité d'avoir un bilan énergétique positif, entre le rendement énergétique des combustibles issus de la biomasse et l'apport d'énergie nécessaire pour planter, fertiliser, cultiver, récolter, transporter, transformer et faire fermenter la biomasse.

D'autre part, si la nature fait bien les choses, elle prend son temps : le rendement énergétique de la photosynthèse naturelle ne dépasse guère 0,25 à 1 % en moyenne annuelle ! Un procédé de photosynthèse artificielle pour la production de carburants carbonés à des échelles de temps et de volume correspondant aux besoins énergétiques doit donc nécessairement être beaucoup plus efficace que le système naturel.

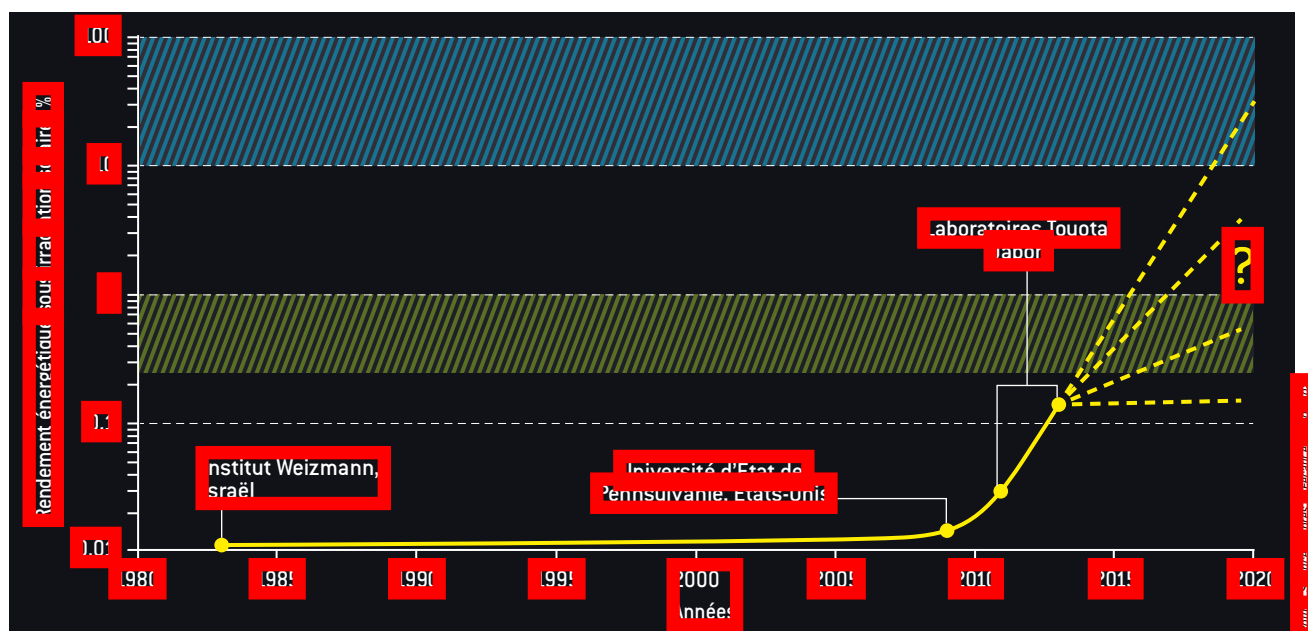


L'ÉQUIPE DE YASUO IZUMI, AU JAPON, a présenté en 2014 un dispositif démontrant la possibilité de synthétiser, à partir de CO_2 et du rayonnement solaire, du méthanol. Un film d'électrolyte polymère est flanqué de part et d'autre de photocatalyseurs. L'irradiation a pour effet de produire d'un côté de l'oxygène et de l'autre du méthanol (CH_3OH).

Un système de conversion photoassistée directe de CO_2 en carburant pourra s'assembler au système de photoélectrolyse mis en œuvre dans les laboratoires pour produire de l'hydrogène par dissociation de l'eau, mis à part la nature des semi-conducteurs et catalyseurs employés. Cette conversion du CO_2 nécessite des atomes d'hydrogène, apportés par l'eau. Dès lors, deux réactions principales entrent en compétition à la photocathode : par exemple la réaction désirée de réduction du CO_2 en méthanol ($\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + 3/2\text{O}_2$) ou en méthane ($\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{O}_2$) et la réaction non désirée et énergétiquement moins intéressante de dissociation de l'eau ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$).

Les scientifiques cherchent des moyens d'éviter autant que possible la seconde réaction, qui fait perdre de l'efficacité. Divers travaux récents ont conduit à des résultats prometteurs, notamment ceux de l'équipe de Yasuo Izumi, de l'université de Chiba au Japon. Ces chercheurs ont tourné la difficulté avec un dispositif réalisant la photo-oxydation de l'eau en protons ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{e}^- + 4\text{H}^+$) et utilisant les protons H^+ ainsi produits pour transformer le CO_2 en méthanol ($\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$), avec une cellule à électrolyse et des catalyseurs

Produire des
**carburants
à partir d'eau
et de CO_2**
est possible si l'on
fournit au système
assez d'énergie



LA CONVERSION DU DIOXYDE DE CARBONE EN CARBURANTS SOLAIRES a connu des progrès importants au cours des cinq dernières années. Mais l'efficacité des systèmes photocatalytiques atteint à peine celle de la photosynthèse végétale (zone verte sur le graphique), alors qu'il faudrait les rendements énergétiques au moins 10 fois supérieurs pour que les carburants solaires deviennent une réalité industrielle (zone bleue).

appropriés (voir la figure page 61). La productivité est de l'ordre de 0,04 micromole (environ 0,9 millimètre cube dans les conditions ordinaires) de méthanol par heure et par gramme de catalyseur, ce qui est mesurable mais encore extrêmement faible. Toutefois, de nombreuses voies d'optimisation de ce concept de pile à combustible inversée restent à explorer.

Carburants carbonés : encore un long chemin

Le développement de procédés de photosynthèse artificielle pour produire des carburants carbonés est ainsi complexe. Encore trop peu de travaux, en comparaison de ceux portant sur la photodissociation de l'eau pour produire de l'hydrogène, lui ont été consacrés. Aussi ce développement n'en est-il qu'à ses premiers balbutiements. À titre d'illustration, quand la feuille artificielle de Daniel Nocera produit de l'hydrogène à partir d'eau et d'irradiation solaire avec un rendement énergétique de 5 % environ, les meilleurs systèmes de laboratoire convertissent le CO₂ avec des performances qui s'approcheraient d'un système naturel, soit un rendement environ 5 à 20 fois inférieur (voir la figure ci-dessus).

En 1983, Martin Halmann et deux collègues, à l'institut Weizmann en Israël, ont mis en œuvre un semi-conducteur

BIBLIOGRAPHIE

N. Kaeffer et al., Les carburants solaires - Photosynthèse artificielle et procédés photo-électrochimiques, *L'Actualité chimique*, n° 397-398, pp. 63-68, juin-juillet 2015.

J.-F. Cornet et al., Ingénierie de la photosynthèse artificielle, *L'Actualité chimique*, n° 397-398, pp. 69-74, juin-juillet 2015.

J. Marshall, Springtime for the artificial leaf, *Nature*, vol. 510, pp. 22-24, 2014.

M. Morikawa et al., Photocatalytic conversion of carbon dioxide into methanol [...], *Catalysis Science & Technology*, vol. 4, pp. 1644-1651, 2014.

H. Ioulohat et L. Forti, La valorisation chimique du CO₂ : les conditions du sens, *L'Actualité chimique*, vol. 371-372, pp. 35-39, février-mars 2013.

A. Regalado, De l'énergie issue de feuilles artificielles, *Pour la Science*, n° 405, pp. 36-39, juillet 2011.

SrTiO₃) permettant d'obtenir un rendement énergétique d'environ 0,01 %. Depuis, la première avancée notable a été la mise au point en 2009, par Oomman Varghese et ses collègues à l'université d'État de Pennsylvanie, d'un photocatalyseur à base de nanotubes de dioxyde de titane (TiO₂) dopés à l'azote, sur lesquels sont déposées des nanoparticules d'or et de platine ; cette équipe a obtenu ainsi des rendements énergétiques de conversion du CO₂ d'environ 0,015 %.

Ces dernières années, des équipes des laboratoires de recherche de Toyota, au Japon, ont mis au point un solide à base de phosphore d'indium (InP) sur lequel est greffé un complexe métallique de ruthénium. Ce phosphore modifié (qui assure la réduction du CO₂) associé à du TiO₂ ou du SrTiO₃ (qui assure l'oxydation de l'eau) a permis d'atteindre des rendements énergétiques proches de 0,14 %. Ces travaux prometteurs semblent par ailleurs indiquer que la séparation des sites d'oxydation et de réduction revêt une importance capitale pour améliorer encore l'efficacité des systèmes.

Le bilan énergétique devra bien entendu prendre en compte l'énergie dépensée pour la capture, le conditionnement et le transport du CO₂, énergie à laquelle est associée une émission de CO₂ dans l'atmosphère. Un procédé de valorisation de CO₂ capturé n'a

Il n'est donc de sens au regard de la lutte contre le réchauffement climatique que s'il ne conduit pas à plus d'émission qu'il n'en soustrait. Il faut également considérer l'aspect économique d'une fourniture en CO_2 suffisamment bon pour être utilisé; on estime aujourd'hui que le coût de la récupération du CO_2 dans les fumées de combustion et sa purification est d'environ 50 à 100 dollars par tonne, ce qui correspondrait à entre 5 et 10 % du prix d'un carburant solaire si son prix de vente devait être comparable à celui (hors taxes) d'un carburant liquide classique.

Pour satisfaire à ces contraintes, certaines équipes proposent une solution passant par la valorisation photo-assistée du dioxyde de carbone en deux étapes: une première consisterait à produire de l'hydrogène issu de la photodissociation de l'eau, et dans une deuxième étape cet hydrogène servirait à convertir le CO_2 par un procédé chimique catalytique plus classique et bien maîtrisé, par exemple la réaction de Sabatier ($\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$) qui est catalysée par des métaux tels que le fer, le cobalt ou le ruthénium.

On peut aussi envisager une réduction partielle du CO_2 en CO , via la réaction bien connue $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$, puis la synthèse d'hydrocarbures selon le procédé Fischer-Tropsch, qui est déjà industrialisé ($n \text{CO} + (2n+1) \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n+2} + n \text{H}_2\text{O}$).

Atteindre un rendement supérieur à 10 %

Pendant, à ces cascades de réactions sont associées bien évidemment des cascades de rendements, et chaque étape supplémentaire représente au mieux un peu de dissipation, au pire une consommation supplémentaire en matière première ou en énergie primaire. Il y a donc un optimum délicat à trouver.

Selon une étude publiée en 2013 par Ellen Stechel et James Miller, des laboratoires Sandia aux États-Unis, la synthèse de carburants solaires via l'utilisation de CO_2 reste un défi, mais est néanmoins tout à fait plausible sur le plan économique à condition que le rendement énergétique global soit supérieur à 10 %. Ce seuil est donc un objectif concret pour les chercheurs.

Le concept de carburant solaire représente un défi, mais il n'est pas farfelu. Pour s'en convaincre, la mise en place sur l'ensemble des terres en jachère en France métropolitaine (500 000 hectares selon l'Insee, soit environ la superficie d'un département) de systèmes convertissant l'énergie solaire en énergie chimique avec un rendement de 10 % permettrait d'assurer la moitié des besoins énergétiques français (de l'ordre de 1 600 TWh). Si une telle conversion de l'usage des sols en France paraît très improbable, ce n'est pas le cas pour des pays comprenant de vastes zones désertiques très insolées, au Maghreb et au Moyen-Orient par exemple.

Reste que plusieurs années de recherche et développement seront nécessaires avant que les carburants solaires trouvent une place dans la transition énergétique qui s'impose à nos sociétés. Pour ce faire, il faudra mobiliser de nombreuses ressources humaines et matérielles, dans le cadre de collaborations internationales étroites – où les clivages idéologiques actuels seraient dépassés...

Dans l'intérêt de la science

mathieu vidard

à la tête au carré 14:05-15:00

france intervenez
franceinter.fr

Faut-il vendre la peau de l'ours polaire ?

Rémy Marion et Farid Benhammou

L'ours blanc, un cousin de l'ours brun adapté à la banquise, est menacé par la réduction et la pollution de son habitat. On peine cependant à quantifier l'impact réel de ces menaces sur ses populations.

Sur une plage de Kaktovik, au nord de l'Alaska, des ours polaires, des animaux pourtant solitaires, cohabitent. Pourquoi ? À cause de la présence d'une carcasse de baleine pêchée par des Inuits, peuple autochtone de cette partie de l'Arctique. Le plus surprenant est moins le recours de plus en plus fréquent à cette ressource alimentaire opportune que le concurrent qui se présentera une nuit pour profiter du festin : un grizzli, c'est-à-dire un ours brun nord-américain. Avec le changement climatique, le seigneur de l'Arctique serait-il en train de se faire supplanter par son cousin brun remontant vers le nord, tandis que son milieu, petit à petit, s'amenuise ?

L'ours polaire est devenu le symbole de la lutte contre le réchauffement climatique. La société occidentale s'est appropriée cet icône au point de la faire figurer non seulement dans toutes les campagnes de sensibilisation, mais aussi dans la communication mercantile de nombreuses sociétés commerciales ou de certaines ONG. L'ours polaire devient notre double, notre reflet sauvage, habitant d'une nature qui nous

L'ESSENTIEL

L'ours polaire est devenu un symbole de la lutte contre le réchauffement climatique.

Ce cousin proche de l'ours brun s'est adapté à la vie sur la banquise. La réduction et la pollution de ce milieu le menacent.

Pour autant, on observe des comportements adaptatifs peu documentés jusque-là.

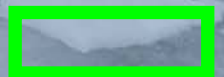
La connaissance de cette espèce et de ses réactions aux changements du milieu étant insuffisante, les menaces sont mal évaluées.

échappe culturellement et géographiquement. Ce grand prédateur est menacé. Sa démarche désinvolte de seigneur régnant sur les plus hautes latitudes ne doit pas nous faire oublier sa fragilité face au démantèlement de son lieu de vie, l'Arctique. Pour comprendre cette espèce, ce mythe vivant, il faut se pencher sur son évolution, son habitat, son aire de répartition, ainsi que sur les menaces réelles ou supposées auxquelles il doit faire face. C'est ce que nous allons faire afin d'entrevoir ses possibilités d'adaptation au changement climatique.

La mesure de Nanouk

Si les recherches de laboratoire et les publications scientifiques ouvrent de larges horizons de compréhension, c'est en passant des mois sur le terrain en tous lieux et toutes saisons que l'on peut prendre la mesure de Nanouk, comme le nomment les Inuits – lesquels ont des relations spirituelles mais aussi matérielles fortes avec l'animal, car, pour eux, c'est un autre de l'homme.

Lorsqu'on passe des années à observer les ours polaires, le moment le plus



LES AUTEURS

Rémy MARION, guide polaire et vidéaste, est, au titre de sa connaissance de la faune arctique, consultant scientifique de Pôle Actions, association de protection des écosystèmes polaires.

Farid BENHAMMOU, géographe de l'environnement, est chercheur associé au laboratoire RURALITES (EA 2252) de l'université de Poitiers ; il enseigne par ailleurs la géographie en classes préparatoires.

SUR LE WEB

Le site de l'association Pôle Actions : www.ourspolaire.org Voir notamment les conférences et les deux derniers colloques internationaux dédiés à l'ours polaire et à l'environnement arctique, organisés à Paris par l'association.

DES HYBRIDES OURS BLANC-OURS BRUN sont observés parfois au nord du Canada et en Alaska, régions où les deux populations d'ours sont désormais en contact. L'interfécondité des deux espèces atteste de leur proximité génétique.

Intense est sans aucun doute la première sortie de tanière. Dans l'antre maternel où les oursons sont nés en décembre, la température est douce. Leur mère leur offre des tétines qui fournissent un lait riche en matières grasses. Ils ont passé trois mois blottis contre elle, et leur poids est passé de 0,8 à 12 kilogrammes. Dehors, début mars, le vent souffle, le paysage est blanc et sans repères, la luminosité intense. Alors que la température extérieure avoisine -40°C , une petite tête apparaît au-dessus d'une banquette de neige, puis une deuxième. Comme lors d'une nouvelle naissance, les oursons découvrent leur univers. Tandis qu'ils jouent déjà, une tête large et massive émerge du trou béant, puis deux pattes aux griffes courbes et puissantes, et enfin un corps énorme. L'ourse, toujours vigilante, veille sur sa progéniture.

Comment ces deux boules de poils immaculées et insouciantes pourront-elles devenir des colosses parcourant la banquise ? Pour répondre à cette question, il faut remonter le fil de l'évolution et considérer étape par étape les adaptations successives ayant abouti à l'ours polaire tel que nous le connaissons actuellement.

Les ancêtres des ours apparaissent au sein des carnivores il y a 22 millions d'années. Proche parent du petit panda, *Arsavus elmensis* n'était pas plus gros qu'un raton laveur. À partir de cette espèce souche, l'arbre évolutif se ramifie au cours du temps, au gré des contraintes environnementales et de la pression des autres espèces animales.

Les premiers à se différencier, il y a 15 millions d'années, sont les ancêtres du grand panda, seul carnivore à ne manger qu'un type de plante, le bambou.

Neuf millions d'années plus tard, c'est au tour des ancêtres de l'actuel ours à lunettes – qui vit encore au nord-ouest de l'Amérique du Sud – d'être sélectionnés, constituant le groupe des ours à face courte. Ces ours investissent l'Amérique. Certains étaient hauts sur pattes, ce qui leur permettait de poursuivre les grands herbivores, et devaient peser près d'une tonne. Ils ont été exterminés par l'arrivée des hommes sur le continent et la concurrence avec les premiers ours bruns et noirs originaires d'Europe et d'Asie. La famille des ursidés, qui comprend l'ours à collier, l'ours noir américain, l'ours lippu, l'ours des cocotiers, l'ours brun et l'ours polaire, n'a réellement fait son apparition qu'il y a 5 millions d'années.

Deux espèces d'ours proches biologiquement

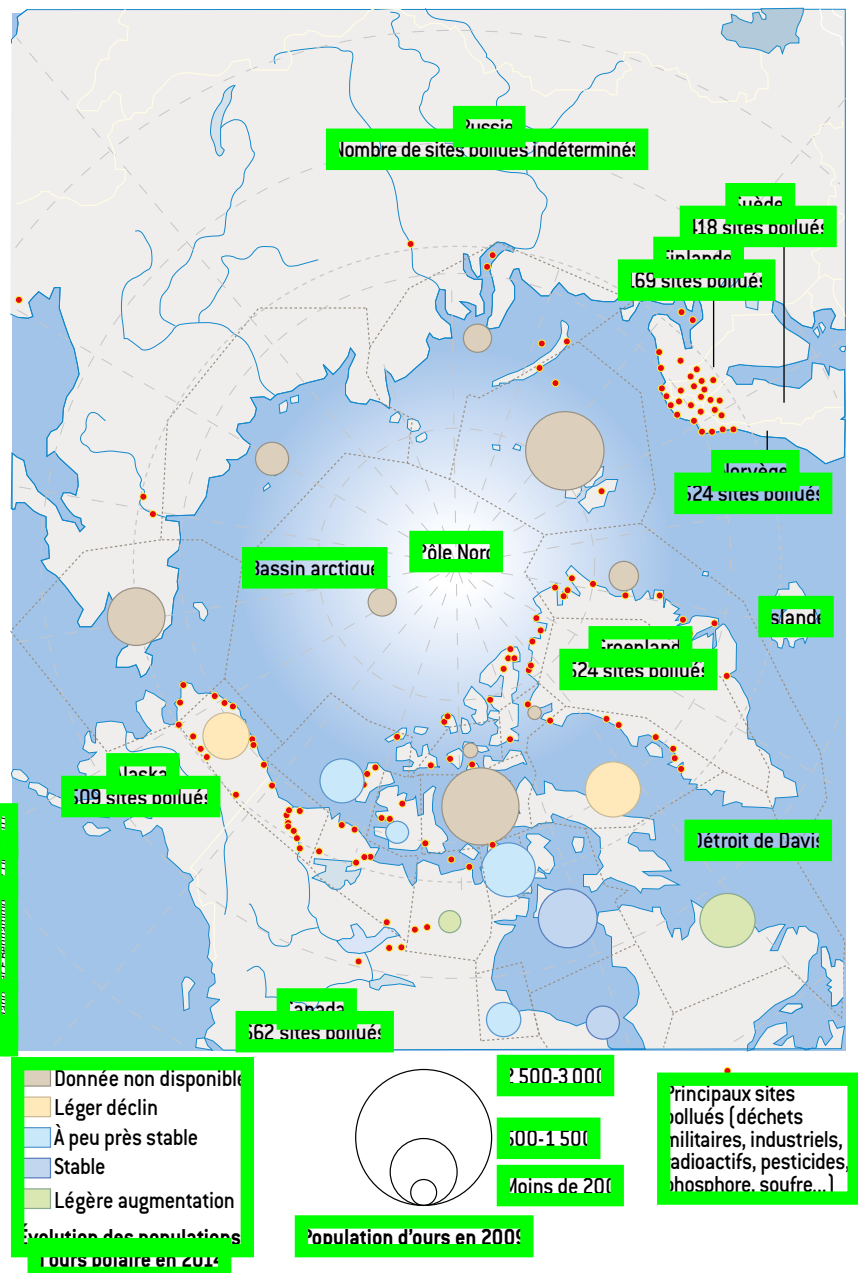
L'ours polaire et l'ours brun sont issus de la même lignée. Les travaux d'Alexandre Hassanin, chercheur au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, démontrent, grâce aux plus récentes études génétiques sur les ADN mitochondrial et nucléaire, que les deux espèces se sont séparées il y a 550 000 ans, c'est-à-dire hier à l'échelle géologique. Par ailleurs, les analyses d'ADN montrent que les ancêtres des ours polaires ont croisé au moins à deux reprises des ours bruns, une première fois voilà 350 000 ans, puis il y a 120 000 ans. Au cours du Pléistocène (il y a 2,58 millions d'années à 11 700 ans), l'alternance des glaciations et déglaciations a permis le croisement des deux espèces qui échangeaient leurs territoires au gré de l'avancée ou du recul des glaces. En période de glaciation, des ours bruns se sont trouvés piégés dans quelques îlots comme les îles Admiralty, Baranof et Chichagof au sud de l'Alaska, mais aussi en Irlande et en Écosse. Pendant ce temps, les ours polaires étendaient leur aire de répartition.

Le plus ancien reste osseux d'ours polaire connu à ce jour a été découvert au Svalbard, un archipel arctique norvégien. Il est daté de 130 000 ans. Les analyses d'ADN ont montré que son propriétaire était davantage « ours polaire » que les ours actuels, des ours bruns étant depuis passés par là. Un exemple frappant est celui d'une



Avec son pelage blanc qui le camoufle bien sur la banquise, ses petites oreilles qui limitent les déperditions de chaleur, des pattes semi-palmées et antidérapantes, ses adaptations physiologiques et comportementales variées qui assurent sa thermorégulation, l'ours polaire est un athlète complet sans égal dans l'Arctique. Sa démarche est aussi très différente de celle de l'ours brun, plus élégante et surtout plus efficace pour se déplacer sur un substrat fragile et glissant. L'ours polaire déambule toujours à la même allure – 4 kilomètres par heure –, vitesse qui optimise sa consommation d'énergie et la production de calories. Le corps plus allongé, mieux profilé, facilite la marche face au vent glacé et la nage sur de longues distances. Une femelle aurait parcouru 600 kilomètres sans toucher terre ! Sauf chez les femelles gestantes, il n'y a pas de repos hivernal chez les ours polaires, mais plutôt un jeûne estival quand la banquise a disparu.

Après une semaine passée autour de la manière, la famille va rejoindre la côte. La femelle n'a rien mangé depuis juillet de l'année précédente. Durant ces huit mois de jeûne, le plus long chez un mammifère, elle a perdu près de la moitié de son poids. Il est temps pour elle de chasser à



nouveau. Dès les premières semaines, les ours doivent apprendre à obéir aux conjonctions de leur mère et à rester calmes. Ils vont téter un peu plus d'un an, même s'ils goûtent très tôt à la viande. La glace de mer est un lieu de vie sans repère où seul l'odorat guide les pas du prédateur. Sans territoire, souvent solitaire, l'ours polaire parcourt une vaste zone pour détecter la présence d'un pinnipède. À chaque situation sa stratégie : affût interminable près d'un trou de respiration, approche à pas feutrés ou plongée pour se fondre parmi les blocs de glace dérivants. La maîtrise de ces techniques de chasse complexes n'est acquise par les jeunes qu'après deux années

l'éducation et d'expériences multiples avec leur mère. L'indispensable transmission du savoir maternel dans cet univers si particulier rend illusoire toute tentative de reproduction des ours polaires en captivité dans le but de préserver l'espèce.

Dès qu'un ours a tué un phoque, il s'empresse de manger le pannicule adipeux, avalant plusieurs kilos de graisse en quelques minutes. Souvent, un autre ours est attiré par l'odeur : s'il est plus puissant, il volera la carcasse et celui qui a dépensé de l'énergie pour chasser n'aura plus qu'à repartir en quête d'une autre proie. Il faut environ 60 phoques marbrés pour nourrir un ours polaire adulte durant une année.



Photo: J. Aars

Avec le réchauffement climatique, les rencontres entre les ours polaires et bruns semblent plus fréquentes en Alaska, au nord du Canada, voire sur la côte ouest de la baie d'Hudson (voir la figure page 66). Sur l'île Victoria, des hybrides ont été observés et parfois abattus), toujours issus de la rencontre d'une femelle ours polaire avec un mâle ours brun. Dans ce cas, les oursons bénéficient de l'éducation indispensable à leur survie, même si certains caractères morphologiques typiques de l'adaptation au milieu arctique tendent à disparaître.

Des comportements adaptatifs

Outre les ressources de la mer arctique, il semble que les ours blancs ne négligent aucune des ressources qu'ils peuvent trouver : pillage de colonies d'oiseaux, recherche de végétaux nourrissants et pêche des ombles arctiques dans la région du Labrador par exemple (voir le cliché ci-dessus à droite). Ces comportements adaptatifs sont étonnants, mais pas nouveaux sans doute, puisque les ours blancs pêchant en rivière avaient déjà été observés en 1770. Autre cas : en avril 2015, sur les rives orientales de l'archipel du Svalbard, Jon Aars, de l'Institut polaire norvégien, photographie un ours polaire en train de manger un dauphin à nez blanc. Cette prédation, en apparence

classique chez le plus grand carnivore terrestre, surprend car cette espèce de dauphin ne remonte normalement pas autant au nord en cette saison. Il s'agit sans doute là d'une conséquence du réchauffement climatique.

Comme évoqué plus haut, les ours polaires profitent aussi des activités humaines. En particulier, ils viennent se nourrir sur les carcasses de baleines abandonnées sur la côte par les Inupiat (voir la photographie ci-dessus). Cette ressource alimentaire constitue un apport énergétique important à la fin de l'été et participe à la survie de la population dans une zone où les nuisances dues à l'exploitation pétrolière sont nombreuses. L'ours polaire, qui cohabite avec les Inuits depuis 20 siècles, subit en effet de nouvelles pressions : exploitation des gisements de carburants fossiles, extraction de minerais, tourisme, navigation.

Il est très difficile d'estimer les effectifs des ours polaires. Dispersés sur un territoire de plus de 21 millions de kilomètres carrés, ils seraient entre 16 000 et 31 000 individus. Les scientifiques ont divisé l'aire de répartition en 19 zones correspondant aux différentes sous-populations (voir la carte page 67). Certaines sont bien documentées, comme l'ouest de la baie d'Hudson ou la mer de Barents, d'autres sont partiellement voire totalement inconnues, notamment côté russe. Faute de moyens logistiques, au nord-est du Groenland par exemple, ou pour

des raisons militaires, peu de chercheurs et même d'humains arpentent ces zones.

Même si les choses s'améliorent, les recensements précédents, réalisés sans véritable concertation entre les États et les différents acteurs (scientifiques, chasseurs autochtones, divers exploitants de l'Arctique) et sans méthodologie homogène, peuvent porter à discussion, ce qui entraîne une vaste manipulation des données. Certaines associations annoncent la disparition de l'espèce, des gouvernements prônent une protection accrue, d'autres comme le Canada parlent de stabilité pour conserver des droits de chasse. En tout état de cause, les données actuelles ne montrent pas de diminution drastique des effectifs. L'Union internationale pour la conservation de la nature prévoit une baisse de 30 % des effectifs sous 40 ans, mais pas la disparition des ours blancs. Des secteurs connaissent effectivement une forte baisse, mais plusieurs sont stables voire en légère hausse, alors que l'ignorance domine dans d'autres.

Les cinq pays arctiques ayant des ours polaires sur leur territoire ont produit un document établissant les mesures à mettre en œuvre pour conserver l'espèce. Au-delà des conflits géopolitiques et des tensions internationales, l'ours polaire est à nouveau un catalyseur, un rassembleur comme il a déjà pu l'être dans les années 1970 en réunissant les cinq nations qui ont créé le



Photo: J. Marion

L'OURS BLANC EST OPPORTUNISTE : IL exploite toutes les ressources possibles pour survivre. Ainsi, cet ours polaire du Nord du Labrador qui pêche le poisson dans une rivière (*ci-contre*), exactement comme le serait un ours brun, un comportement qui était connu mais n'était que très rarement observé ; ou encore cet ours qui a rejoint des goélands bourgmestres charognards afin de profiter de l'aubaine d'une baleine (*à gauche*). Ci-dessous, une mère ourse élève ses petits à la limite de la forêt boréale.



Conseil de l'Arctique en 1996. Le document de synthèse publié début septembre 2015 par les cinq pays renforce l'effort scientifique pour aboutir à une meilleure connaissance des effectifs de l'ours polaire et de leurs variations régionales. Tous les chercheurs sont d'accord sur un point : la principale menace pesant sur l'ours polaire est le réchauffement climatique.

***Ursus maritimus* menacé**

Les seules mesures de conservation vraiment efficaces à long terme seront celles qui participeront à une stabilisation des émissions des gaz à effet de serre. Couplées à une connaissance accrue des populations et à une gestion locale de la protection et des prélèvements par les autochtones, elles laissent espérer une conservation de l'espèce pour plusieurs décennies.

Ce qu'il faut dénoncer, c'est l'appropriation par les zoos et delphinariums du concept de disparition des ours polaires. Encouragées par l'Association internationale des zoos, ces structures récréatives favorisent la reproduction des ours polaires en captivité sous prétexte de protéger l'espèce. Les oursons naissant en captivité, représentent une manne financière considérable. Toutefois, comme ils sont incapables de survivre dans la nature, ils ne contribuent pas à la conservation de leur espèce.

Autre problème, la pollution dans l'Arctique (*voir la carte page 67*). Les polluants se concentrent en effet en bout de chaîne alimentaire, donc dans les chairs de ce superprédateur qu'est l'ours blanc. Si le phénomène est de mieux en mieux documenté, pour l'heure, aucun résultat n'établit clairement l'impact de la pollution sur la santé et la reproduction de l'espèce.

Une raison d'espérer est que, d'après les données que nous avons collectées, les experts du Groupe de spécialistes de l'ours polaire (*Polar Bear Specialist Group*) auraient été un peu trop pessimistes dans leur prospective. Même s'il est évident que l'épaisseur et la superficie de la banquise arctique diminuent dans l'ensemble, sa variabilité peut tout bien profiter à l'ours polaire. Ce fut le cas en cet été 2015 dans la baie d'Hudson, où l'on n'avait jamais vu une couverture de glace aussi importante. En fait, l'Arctique, avec ses courants marins et les vents qui la parcourent, est très difficile à modéliser (et à étudier) et, pour le moment, la connaissance que nous en avons est insuffisante.

La protection et la conservation de l'ours polaire sont en fait l'affaire de chacun puisqu'elles coïncident avec la lutte contre le réchauffement climatique ; elles ne relèvent pas seulement des pays arctiques qui en ont la gestion : au-delà du symbole, l'ours polaire doit être une alarme nous incitant à modifier nos modes de vie. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Marion et F. Benhammou, Géopolitique de l'ours polaire

Polar Bear (*Ursus maritimus*) Conservation Management Plan, Draft. U.S. Fish and Wildlife, Region 7, Anchorage, Alaska, 2015 (www.fws.gov/alaska/nbrt/)

A. Hassanin, The role of Pleistocene glaciations in shaping the evolution of polar and brown bear. Evidence from a critical review of mitochondrial and nuclear genome analysis, *Comptes Rendus Biologies*, vol. 338(2), pp. 494-501, 2015.

J. Marion, Dernières nouvelles de l'ours polaire, *Philes d'images*, 2009.

EDMOND PÂRIS

de la pirogue au bateau

Géraldine Barron

Au XIX^e siècle, fasciné par l'ingéniosité des pirogues rencontrées lors de ses voyages, un jeune officier de la Marine se prend de passion pour la construction navale. Le récent bateau à vapeur devient vite son cheval de bataille...

Qui n'a jamais rêvé de prendre la mer pour découvrir le vaste monde sur les traces des grands explorateurs qui ont laissé leur nom dans l'histoire ? Les Christophe Colomb, Magellan, Bougainville ou encore Lapérouse ont fait naître bien des vocations de marins, de voyageurs ou d'aventuriers. C'est peut-être à ces hommes que pense le jeune Edmond Pâris lorsqu'il entre en 1820 au Collège royal de la Marine d'Angoulême. Ce choix de carrière n'est pas le fruit d'une passion, mais d'une décision familiale visant à assurer un avenir au fils aîné d'une famille désargentée par la chute de l'Empire : l'enfant présente de bonnes dispositions pour le dessin et les mathématiques, un oncle se charge des recommandations nécessaires et voilà Edmond élève de la Marine à une bonne vingtaine de lieues de la mer.

C'est pourtant bien une passion qui fera de Pâris une figure incontournable de la Marine. Cette passion lui permettra de traverser le XIX^e siècle, les régimes et programmes navals successifs, de gravir un à un les échelons jusqu'au grade de vice-amiral tout en conservant un enthousiasme juvénile et une grande accessibilité. Elle fera de lui un passeur entre générations de marins, mais aussi entre ingénieurs, marins et mécaniciens, pouvant avec aisance d'une discipline à l'autre : de la mécanique à l'archéologie en passant par l'histoire, la chimie et l'ethnographie. L'objet de cette passion n'est ni la mer ni l'aventure, mais l'outil de travail de tout marin : le bateau.

A Angoulême, cependant, Pâris en est encore bien loin. On ne devient pas marin en parcourant les vertes collines de Saintonge. Après deux années

à vapeur

L'ESSENTIEL

En 1826, un jeune apprenti officier embarque pour le Pacifique à bord de l'*Astrolabe*.

Il développe une passion pour les bateaux traditionnels non européens et la construction navale.

De retour en France, il s'intéresse en particulier aux bateaux à vapeur, introduits depuis peu dans la marine de l'État.

Curieux, enthousiaste et inventif, il devient un pilier de la transition vers la vapeur, apprécié tant des marins que des ingénieurs et des mécaniciens.

LE *CASTOR*, ici sur une peinture de François Roux (1836), fut l'un des premiers navires à vapeur français. En 1835, à l'âge de 29 ans, Edmond Pâris obtint le commandement de cet aviso à roues qui assurait la liaison entre Toulon et Alger. Il explora les propriétés du bateau avec tout autant de passion que la variété des pirogues au cours de ses précédents périple.

sur les bancs du collège, les apprentis officiers prennent enfin le large afin d'apprendre les rudiments de leur métier. Pâris a la chance d'achever sa formation dans un cadre prestigieux : en 1826, il embarque sur l'*Astrolabe*, corvette destinée à une mission d'exploration dans le Pacifique sous le commandement de Jules Dumont d'Urville.

Dessinateur de pirogues

Pour le jeune homme, cette campagne est placée sous le signe de la découverte : il est entouré d'officiers savants qui l'initient à la pratique scientifique, en particulier à l'hydrographie, consistant à établir les cartes des côtes longées ; il y connaît la peur du naufrage, la maladie qui affaiblit le corps et l'esprit, mais aussi l'émerveillement face aux nouveaux paysages ou devant les épaves des navires de l'infortuné Lapérouse. Il éprouve surtout la fierté de se voir confier par le chef d'expédition la tâche de dessiner tous les types de pirogues rencontrés dans le Grand Océan, mission dont il s'acquitte scrupuleusement.

Quelques mois seulement après le retour à Toulon de l'*Astrolabe*, on propose à Pâris le titre d'hydrographe en chef sur la *Favorite*, qui part pour un tour du monde sous le commandement de Cyrille Laplace ; cette campagne de trois ans lui permet de conforter ses talents d'hydrographe, mais surtout de compléter sa collection de plans et dessins de bateaux traditionnels. L'ingéniosité que les hommes déploient pour affronter l'élément liquide le fascine, de même que la variété des solutions adoptées dans les différentes régions du monde, toujours parfaitement adaptées aux conditions locales de navigation. Lui semble-t-il.



EDMOND PÂRIS [1806-1893] vers 1885, à sa table de travail au musée de Marine du Louvre – aujourd'hui le musée national de la Marine –, à Paris, qu'il dirigea de 1871 à sa mort. Pâris en fit un conservatoire de la construction navale.

De retour en France, non seulement Pâris a satisfait son désir de lointain, mais toutes ces expériences ont attisé sa passion pour le bateau lui-même. Nommé à Paris en 1831 pour travailler à la publication des cartes levées sur la *Favorite*, Pâris assiste aux cours publics du Conservatoire des arts et métiers, autant pour tuer le temps que pour remédier aux carences de sa formation initiale, dont il a pris conscience au contact d'officiers issus de l'École polytechnique et de savants. Il y découvre les principes de la propulsion par la vapeur et se documente sur ses applications dans la navigation, avant d'obtenir en 1835 le commandement du *Castor*, un navire à roues qui assure la liaison entre Toulon et Alger.

La vapeur est timidement introduite dans la marine de l'État, qui dispose d'une flotte à voiles performante. On lui reproche avec raison sa piètre efficacité, son caractère peu militaire, les risques d'explosion des chaudières ; enfin, les équipages ne sont pas formés à ce nouveau type de propulsion et il faut recruter des ouvriers civils, axés d'être des fauteurs de trouble au sein d'équipages militaires tenus à une discipline très stricte.

Les commandements de bâtiments à vapeur sont alors peu prisés, mais ils offrent une liberté semblable à celle que Pâris a goûtée lors de ses voyages lointains : discipline allégée, possibilité de se livrer à des expériences de montage et démontage des aubes, de variation des quantités et des pressions de vapeur. Il peut se permettre de descendre dans la machine, ce qui est indispensable pour que le capitaine comprenne le fonctionnement de son navire. Pâris y déploie un enthousiasme et une activité inventive remarquables : il dessine



À BORD DE LA FAVORITE, ENTRE 1830 ET 1832, Pâris peignit de nombreux bateaux traditionnels « d'après nature », tel le *Pingdjadjap*, un petit bateau caboteur des environs de Sineapour [à gauche], et le *Gau Yew*, une jonque observée sur la côte vietnamienne [à droite].

et fait réaliser des pièces, des outils, et même une lampe pour éclairer sous l'eau.

Son mandat de deux ans achevé, Pâris s'adresse une troisième fois à l'appel du lointain. Il repart avec Laplace et l'*Artémise* pour un tour du monde au cours duquel il enrichit encore son portefeuille de plans et de dessins de bateaux. Il n'en oublie pas pour autant la vapeur. Mais, alors qu'il visite une fonderie en Inde, il est victime de sa curiosité et perd l'avant-bras gauche, broyé dans un engrenage. Cet accident le désole, car il craint de ne plus pouvoir naviguer, mais l'événement favorise la naissance d'un mage de héros de la technique.

À toute vapeur

À son retour, Pâris publie un *Essai sur la construction navale des peuples extra-européens*, illustré de nombreuses planches, qui recense et décrit les multiples solutions techniques adoptées de par le monde pour se déplacer sur mer. Pâris y renouvelle l'expression de son admiration pour la construction navale traditionnelle, qu'il considère en symbiose avec son environnement naturel et social. À n'en pas douter, la fréquentation des sciences naturelles lui a donné une perception synthétique du bateau qui ne se limite pas à la seule technique, mais englobe des questionnements économiques, sociaux, environnementaux, lesquels guideront aussi ses recherches sur la navigation à vapeur.

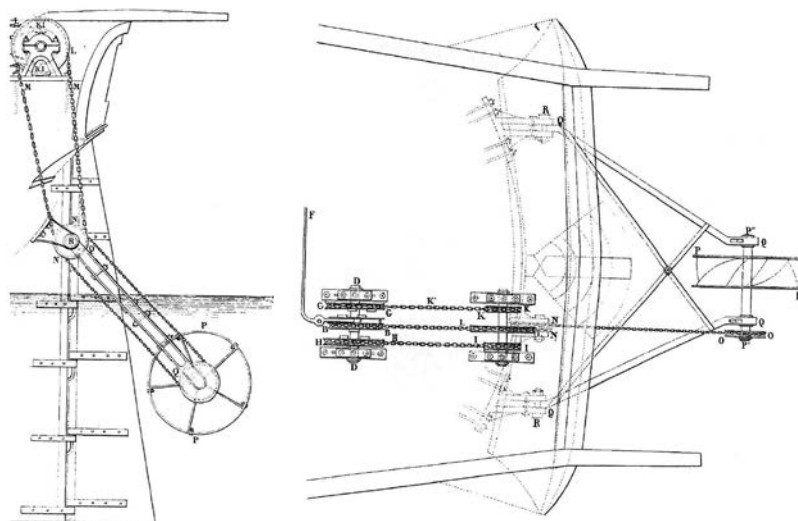
Avec le temps, le navire de guerre à voiles est parvenu à un état comparable de perfection, mais l'introduction de la machine à vapeur remet tout en cause et Pâris propose de s'inspirer de quelques solutions techniques adoptées sur les bateaux extra-européens. Notamment, des jonques chinoises, il suggère de reprendre, en les adaptant, la fausse quille, les bordages obliques et les voiles lattées.

Tout manchot qu'il est, Pâris est désormais reconnu comme un spécialiste des questions de construction navale. Il doit cette reconnaissance à ses voyages lointains, à l'*Essai* aussi bien qu'à sa première expérience de la vapeur; mais il la doit surtout à un homme qui a su très tôt déceler chez lui les qualités d'un ingénieur et l'encourager dans cette voie: le baron Jean Tupinier, directeur des ports et des arsenaux, qui lui a confié le *Castor* et l'a invité à publier sa collection de plans. Tupinier et ses successeurs lui offrent une série de commandements de bâtiments à vapeur de dernière génération: capitaine

MANŒUVRES DELICATES

En 1836, aux commandes du *Castor*, Pâris manqua le faire aborder sur Minorque, tant le vapeur était lourd et peu manœuvrant à faible vitesse. Il conçut donc un appareil à ajouter au navire pour l'aider à pivoter sur place – à évoluer en langage maritime.

Pâris s'inspire du dispositif étonnant inventé par cette société d'une force perpendiculaire au navire grâce à une roue à hélice entraînée par la machine à vapeur. Ingénieux, son évoluteur n'eut cependant pas le succès attendu. Son beau-père, capitaine, travaillait aussi sur la question; soucieux de sa notoriété, il commença par revendiquer la paternité de l'évoluteur en déposant un brevet sur sa propre invention, puis en fit la publicité et, alors seulement, réalisa des expériences. Pâris, lui, s'était contenté d'envoyer les plans de son évoluteur au directeur des ports, qui, enthousiaste, avait lancé sa construction. Mais le test n'eut pas lieu, Pâris ayant reçu entre-temps une nouvelle mission en Chine... Pâris se consola en diffusant largement les plans et détails de son invention.



en terre de navires en construction, il approfondit ses connaissances de la machine, dialogue avec les ingénieurs et propose des ajustements dictés par son expérience de la navigation; à la mer, il cherche à améliorer la durée de vie et le rendement de la machine et à établir le meilleur compromis voile/vapeur afin d'augmenter l'autonomie du navire. Cet aspect est d'autant plus crucial dans les navigations au long cours que la France, à la différence de l'Angleterre, ne dispose pas de points de ravitaillement en charbon outre-mer.

Pâris peut s'enorgueillir d'être aux commandes de l'*Archimède*, premier vapeur français à franchir le cap de Bonne-Espérance en 1844, mais il regrette de n'avoir pas été autorisé à boucler le premier tour du monde à la vapeur (le navire est en effet attaché à la station des mers de Chine et sert de décor à la signature du traité de Whampoa, traité de commerce entre la France et la Chine). En 1846, il reçoit pour mission de mener la construction de l'avisovapeur le *Comte d'Eu*, qui doit être équipé

des techniques les plus innovantes (coque en fer, propulsion à hélice, chaudières tubulaires) tout en satisfaisant aux exigences d'un yacht royal: une gageure qu'est prêt à relever Pâris malgré la mésentente entre les constructeurs du navire et de la machine. Lors d'une croisière d'essais, la chaudière du *Comte d'Eu* explose, causant la mort de onze hommes; Pâris est le premier à descendre dans la fournaise porter secours aux rescapés, ce qui conforte l'image de héros de la vapeur.

Favorisé par le pouvoir sous la monarchie de Juillet, Pâris connaît un court passage à l'écart lors des changements de régime au milieu du siècle, mais cela ne coupe pas court à ses commandements et à ses recherches. Il renoue avec les dernières innovations en matière de construction navale à l'occasion de la guerre de Crimée en obtenant le commandement d'un vaisseau «mixte», c'est-à-dire un vaisseau de guerre à voiles jumboisé (rallongé) pour être équipé d'une machine. Il teste ensuite une des premières frégates de guerre rapides à

hélice, puis la première frégate cuirassée, conçues par le fertile ingénieur Stanislas Dupuy de Lôme.

Depuis sa première expérience de navigation à vapeur, Pâris déplore qu'aucune documentation technique ne guide le marin dans cette pratique nouvelle; de même, le mécanicien formé à terre à la conduite d'une machine à vapeur ne découvre que sur le tas les propriétés de la machine marine. Il comble cette lacune en publiant d'abord un dictionnaire qui fixe et définit le vocabulaire technique (*voir l'encadré page ci-contre*), puis une série de manuels à destination des mécaniciens et des marins.

Pour s'adresser à la fois à des hommes de terrain et à des officiers armés d'un certain bagage scientifique, Pâris lit, dépouille et annote quantité de traités théoriques tout en recueillant un maximum de données factuelles (consommation de charbon, vitesse du navire, régimes de la machine, etc.). Il sollicite ses confrères de la marine militaire, mais étend aussi son réseau d'informateurs dans la marine de commerce et dans les marines étrangères. De cette masse d'informations, il extrait des constantes, des règles ou du moins des astuces susceptibles de guider les marins et mécaniciens. Dans ses ouvrages, illustrés de nombreux plans et schémas, il

vulgarise les notions scientifiques indispensables à la compréhension des phénomènes en jeu dans la machine à vapeur tout en s'appuyant sur des cas pratiques: comptes rendus d'expériences, analyses de pannes et de rapports d'incidents, etc.

Les recherches appliquées de Pâris permettent d'apporter des perfectionnements de détail au matériel; en assurant la formation des hommes, ses publications contribuent à réduire le nombre d'accidents et à améliorer la conduite des navires. Ces travaux facilitent la transition de la voile vers la vapeur en faisant tomber les réticences des plus réfractaires; ils sont récompensés par un premier prix de l'Exposition universelle de 1855, qui renforce la popularité de Pâris, très apprécié des mécaniciens et des officiers de marine tant dans la flotte de guerre que dans celle de commerce. Son expertise est reconnue en France, mais aussi à l'étranger, et il est invité à siéger dans de nombreux conseils et commissions qui traitent du matériel et du personnel navals; car si Pâris milite pour le perfectionnement du matériel, il s'engage aussi pour une meilleure formation des hommes et une plus grande reconnaissance de la responsabilité des mécaniciens dans la bonne marche du navire. Cette évolution

est sanctionnée en 1860 par la création d'un corps d'officiers mécaniciens.

Pâris quitte le pont des vapeurs en 1861 après 42 ans de service, dont 25 en mer. Il entame une carrière sédentaire pour laquelle il fait valoir ses travaux géographiques, quelque peu anciens mais toujours auréolés du prestige associé aux voyages d'exploration: il est élu à l'Académie des sciences et dans plusieurs sociétés savantes, prend la direction du Dépôt des cartes et plans de la Marine (ancien nom du Service hydrographique de la Marine, qui détient l'exclusivité de la production des cartes marines). Il poursuit néanmoins son travail de veille technique et conserve son statut d'expert de la construction navale: membre du jury des Expositions universelles de 1862 et 1867 ainsi que de plusieurs expositions internationales, il continue de publier des ouvrages et des articles rendant compte de l'évolution du matériel.

In musée de la construction navale

Lorsque Pâris atteint l'âge de la retraite, il reporte son énergie sur le musée de Marine du Louvre, qu'il dirige de 1871 à sa mort, en 1893. Il défend même l'institution contre les conservateurs des départements de beaux-arts, qui lorgnent les quelques salles rassemblant maquettes, instruments de navigation et échantillons de bois et de cordages; Pâris souhaite en faire un conservatoire de la construction navale, à l'image du Conservatoire des arts et métiers où il a reçu sa première formation technique. Il fait don au musée non seulement de sa bibliothèque, riche de plusieurs centaines d'ouvrages historiques ou techniques, mais aussi de la collection de plans qu'il a constituée au long de sa carrière, à laquelle s'ajoutent les travaux de son fils Armand: bateaux traditionnels du monde entier côtoient les navires de guerre et de commerce du siècle.

Lorsque, jeune officier, il découvrait le monde, Pâris avait été frappé par la rapide disparition des embarcations traditionnelles. Certaines, telles les grandes pirogues de voyage du Pacifique observées par Cook au XVIII^e siècle, étaient déjà introuvables dans les années 1820; d'autres, modifiées avec les nouveaux matériaux ou techniques des Occidentaux. Il découvre aussi qu'il est très difficile de retrouver des traces de navires disparus, y compris les plus récents; et même si des plans sont conservés dans



CETTE MAQUETTE DU FUNE, un grand caboteur japonais, réalisée en 1871 d'après les plans d'Armand et Edmond Pâris, est l'un des quelque 580 modèles construits pour le musée de Marine du Louvre entre 1871 et 1893.

Le galvanisme expliqué aux marins par Pâris

Théorie des effets de l'électricité produite par le contact de deux métaux découverte en 1790 par Galvani [...]. Des deux métaux en contact et exposés à l'humidité, l'un s'oxyde aux dépens de l'autre : ainsi, lorsque du cuivre et du zinc se touchent dans la mer, le premier reste intact, tandis que le second est rongé en peu de temps. [...] Dans les machines à vapeur, le cuivre est si fréquemment en contact du fer, que les effets galvaniques sont

très énergiques sur ce dernier, qui est promptement rongé et réduit à un faisceau de fils parallèles ; on en voit les effets sur les tiges de pompe alimentaire et sur tout ce qui est attaché aux robinets. Malheureusement le prix élevé du cuivre lui fait préférer le fer, que les fabricants mettent partout où ils le peuvent. Ainsi on a vu des tiges de clapet de pompe à air en fer, et journellement les tuyautages en cuivre sont boulonnés en fer, ce qui devient

bientôt très dangereux ; aussi on éprouve bientôt des fuites qui nécessitent le changement des boulons et la substitution du cuivre au fer. L'eau de mer active beaucoup l'effet galvanique, et les tiges de piston ou des arbres de navires naufragés ont été rongés avec rapidité aux environs du cuivre, tandis qu'en s'en éloignant l'effet était à peine sensible [...]. En deux ans, un arbre d'hélice de 650 chevaux a été rongé de 5 centimètres, creusé en quelques parties

l'autant, l'une des clavettes de l'hélice totalement détruite, l'autre à moitié. [...] La tôle est de toutes les espèces de fer la plus sensible aux effets du galvanisme ; aussi, dans les chaudières, il faut redouter le contact et même le trop grand voisinage du cuivre, surtout dans les parties basses, toujours exposées à l'humidité et très difficiles à visiter »

— Edmond Pâris
Dictionnaire de marine
voiles et à vapeur. 1859

es archives de la Marine, ils sont inaccessibles au plus grand nombre. Pâris compare volontiers les bateaux aux constructions de pierre auxquelles l'archéologie et le service des monuments historiques apportent toute leur attention alors même qu'ils sont toujours debout ou laissent des traces tangibles.

Son programme pour le musée se résume en quelques mots : « Ne pas laisser échapper ce qui reste du passé, et [...] suivre le présent, tant qu'il durera. » Il ajoute que l'étude des bateaux est au moins aussi importante que celle des églises ou des châteaux, car ils ont permis aux Européens de découvrir le monde, ont été et sont encore l'instrument de conquête de nouveaux territoires et de nouveaux produits pour le commerce européen. Il tisse donc un lien intime entre technique et histoire. Il lance un appel aux marins, aux constructeurs et aux États afin de collecter un maximum de plans ou d'informations permettant de reconstruire à échelle réduite les bateaux de tous les temps et de tous les pays.

Ainsi, entre 1871 et 1893, le musée de la Marine s'enrichit de près de 580 modèles, dont la moitié sont construits dans l'atelier du musée sous la direction attentive de Pâris, d'après les plans qu'il reçoit ou qu'il dessine, reconstitue ou calque. Pâris craint cependant que cette collection de maquettes ne disparaisse à son tour, victime de l'humidité, du feu ou de la négligence des hommes. Il veut que cette mémoire navale lui survive et est persuadé que ce n'est possible que par la dispersion, et donc la reproduction. Il fait graver et tirer en plusieurs centaines d'exemplaires sa collection de plans, qu'il rassemble en cinq volumes

L'AUTEURE



Géraldine BARRON, archiviste-paléographe, est conservatrice à la bibliothèque de l'université

du Littoral Côte d'Opale, à Calais.

À ÉCOUTER

Le jeudi 7 janvier 2016, de 14h à 15h, Géraldine Barron viendra sur le parcours peu commun d'Edmond Pâris dans la partie « Actualité » de l'émission *La marche des sciences* sur France Culture. www.franceculture.com

BIBLIOGRAPHIE

G. Barron-Fortier, *Entre tradition et innovation : itinéraire d'un marin, Edmond Pâris (1806-1893)*, thèse de doctorat, 2015 <http://bit.ly/1HkUMII>

Le blog de Géraldine Barron : <https://paris.hypotheses.org>

E. Descleves, *L'art de la navigation dans le Pacifique*, *Pour la Science*, n° 408, octobre 2011.

intitulés *Souvenirs de marine conservés : collection de plans ou dessins de navires et de bateaux anciens ou modernes, existants ou disparus : avec les éléments numériques nécessaires à leur construction*. Ces *Souvenirs* constituent encore aujourd'hui une somme de référence, même si les progrès de l'archéologie navale, notamment subaquatique, ont conduit à remettre en cause certaines interprétations de Pâris sur les navires disparus.

Quelques jours avant sa mort, survenue le 8 avril 1893, Pâris arpenteait encore les couloirs de son musée. Les discours prononcés sur sa tombe par la fine fleur de la Marine et du monde scientifique sont révélateurs d'une personnalité hors norme qui n'a jamais vraiment su trouver sa place, mais est parvenue à se faire accepter de tous. Pour les marins, il fut un savant, car peu d'officiers ont poussé aussi loin l'étude de leur outil de travail ; mais pour les savants, il fut avant tout un marin, un homme de terrain et de pratique dont le franc-parler, à l'écrit comme à l'oral, dénotait avec les codes académiques. Son approche totalisante du bateau a su transcender les frontières de plus en plus marquées entre disciplines, entre le rôle de l'ingénieur et celui de l'officier de marine, entre théorie et pratique, entre conception et usage.

Il fut un notable dont la notoriété s'est établie bien au-delà des frontières, mais aussi un original qui, à la fin du siècle, parut délicieusement anachronique : de par son grand âge, il était l'un des derniers officiers à avoir connu les grandes heures de la marine à voiles. Cette image masqua la modernité de sa vision du bateau et de la technique, qui mit près d'un siècle à s'imposer. ■

Abonnez-vous à **POUR LA SCIENCE**



En CADEAU de bienvenue :

À la rencontre des Comètes, de Halley à Rosetta.

Par Thérèse Encrenaz et James Lequeux

« En novembre 2014, la sonde européenne Rosetta s'est approchée d'une comète lointaine. La mission était à haut risque technologique: pour la première fois, un robot s'est posé à la surface d'un noyau cométaire. Tout comme la pierre de Rosette a aidé Champollion à décrypter les hiéroglyphes égyptiens, Rosetta, en dévoilant quelques mystères qui entourent encore les comètes, aidera les scientifiques à mieux comprendre l'histoire du Système solaire. Pourquoi leur apparition dans le ciel, interprétée comme un mauvais présage dans l'Antiquité, a-t-elle toujours un tel impact médiatique? Comment les scientifiques ont-ils finalement découvert le secret de leur trajectoire? Et que savons-nous de leur origine? C'est à ces questions et bien d'autres que répond ce livre abondamment illustré. »

Éditions Belin - Paris le 23 mars 2015 - 144 pages - Prix unitaire: 22,90 €

OFFRE SPÉCIALE D'ABONNEMENT

■ POUR LA
SCIENCE

retourner accompagné de votre règlement à : Service Abonnement 19 rue de l'Industrie 67402 Illkirch (Cede)

Votre abonnement
PASSION

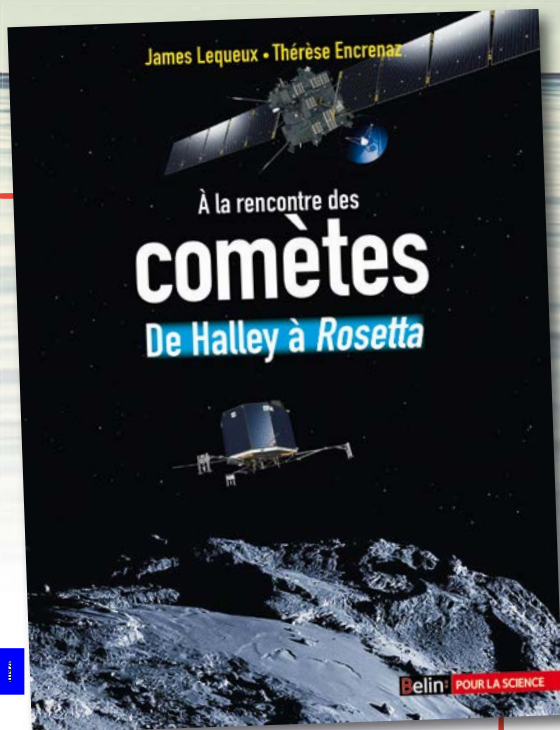
6,50€
par mois
seulement

le magazine

+ le hors-série chez vous

+ les versions numériques offertes

sur **www.pourlascience.fi**



1. MA FORMULE

☒ **OUI**, je m'abonne à l'offre « Passion » à 6.50€ par mois.

Je reçois le magazine *Pour la Science* (12 n°/an)

+ son hors-série *Dossier Pour la Science* (4 n°/an)

+ mon cadeau.



non sans
de bienvenue

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

_____@_____

réception de votre

2. MES COORDONNÉES

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Pays :

Tél. :

3. MON MODE DE RÈGLEMENT

☒ Je règle par prélèvement 6.50€ par mois* et reçois en cadeau

le livre *A la rencontre des comètes*. Je remplis l'autorisation

ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC. (PASPVK4)

Pour la France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'Europe (pays de la zone SEPA) : 7.90€ par mois.

Annulé à tout moment auprès du service abonnement avec un préavis de 3 mois. Conditions complètes sur www.pourlascience.fi

AUTORISATION

DE PRÉLÈVEMENT PAR

MANDAT SEPA

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

4. COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom

Adresse

5. COORDONNÉES BANCAIRES

IBAN

Numéro d'identification international du compte bancaire - IBAN (International Bank Account Number)

BIC

Code international d'identification de votre banque - BIC (Bank Identifier Code)

Type de paiement

Paiement récurrent/récurrent

■ POUR LA
SCIENCE

6. DATE ET SIGNATURE OBLIGATOIRE

Date

Signature

7. NOM DU CRÉANCIER

Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

SIC N° FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM)

☐ Je préfère régler mon abonnement d'un an en une seule fois 79€**

sans bénéficier du cadeau. (PAS1A)

** Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16€ - autres pays 35€

☐ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Par carte bancaire N°

Date d'expiration

Exp

Signature obligatoire

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 également adresser vos propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de nous en aviser.

LOGIQUE & CALCUL

Le problème des 8 reines... et au-delà

De combien de façons différentes peut-on placer n reines sur un échiquier de taille $n \times n$ dans des positions compatibles ? Posé depuis bientôt deux siècles, ce problème dit des n reines n'est résolu que jusqu'à $n = 26$.

Jean-Paul DELAHAYE

En 1848, un joueur d'échecs allemand, Max Bezzel, pose le problème suivant : est-il possible de placer 8 reines sur l'échiquier de façon qu'aucune ne soit « en prise » (sous le feu d'une autre) ? Rappelons qu'une reine menace toutes les cases de la ligne, de la colonne et des deux diagonales passant par la case qu'elle occupe.

Puisqu'il n'y a que 8 lignes horizontales sur l'échiquier, et qu'une reine au plus peut se trouver sur une telle ligne dans une

solution du problème, il est certain qu'il n'y aura pas plus de 8 reines indépendantes sur l'échiquier 8×8 : s'il existe des solutions, elles comporteront toutes une reine par ligne au maximum. Il en va de même pour les colonnes et les diagonales.

Carl Friedrich Gauss (1777-1855) étudia le problème et le résolut partiellement en proposant 72 solutions avec, pour chacune, 8 reines sur l'échiquier de 64 cases, mais avait oublié certaines solutions. La première solution complète fut proposée en 1850.

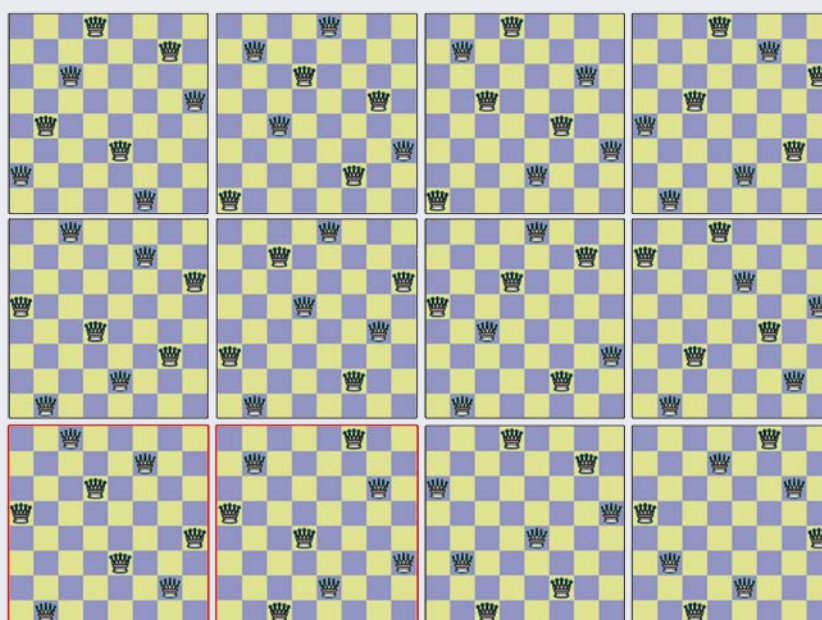
par Franz Nauck. Il existe 92 dispositions convenables, donc 20 de plus que celles trouvées par Gauss. Elles se réduisent à 12 quand on enlève les configurations se déduisant d'une autre par des rotations ou des symétries. Deux de ces 12 solutions ont une jolie propriété : il n'existe jamais trois dames alignées, quelles que soient les droites envisagées. Essayez de les trouver (sans consulter l'encadré ci-dessous).

La généralisation du problème de Bezzel consiste à envisager un échiquier carré

Les 12 solutions de base pour l'échiquier 8×8

On cherche à placer le plus grand nombre possible de reines sur l'échiquier de façon qu'aucune ne soit en prise sur une autre.

On ne peut en placer que 8 au plus car il est impossible d'en mettre 2 sur la même ligne (ou la même colonne). On découvre par tâtonnements qu'il existe des configurations satisfaisantes avec 8 reines. Il y en a 92, qui se réduisent à 12 quand on retire les configurations identiques à une symétrie près ou à une rotation près. Parmi ces solutions, 2 ont la propriété de ne contenir aucun triplet de reines alignées, ce sont les solutions dont le cadre est ici marqué en rouge.



de n cases de côté et à essayer d'y placer n reines. C'est le « problème des n reines ». On découvre sans mal que pour $n=2$ et $n=3$, c'est impossible. En revanche, pour $n \geq 4$, cela semble toujours possible.

On envisage deux aspects du problème :

- (i) trouver pour tout n une solution, s'il en existe ;

- (ii) trouver toutes les solutions ou seulement les dénombrer, au moins pour les premières valeurs de n .

Une solution, oui : toutes les solutions, non

Le problème (i) est aujourd'hui parfaitement résolu, cela sans avoir besoin d'un ordinateur : on décrit un procédé général sous forme géométrique qui, pour tout $n \geq 4$, construit une configuration convenable. De tels procédés sont nombreux et on en découvre régulièrement de nouveaux.

La version (ii) est bien plus délicate. Imaginer des procédés simples qui, pour tout entier n , décrivent toutes les solutions ne semble pas envisageable. On utilise donc les ordinateurs pour effectuer des calculs systématiques. C'est un exercice de programmation que tout étudiant en informatique a pratiqué au moins une fois. Il est assez facile d'écrire un programme qui traite le problème jusqu'à $n=12$. Aller au-delà demande plus de soin et de patience et fait l'objet de records qui, à cause de l'explosion combinatoire, évoluent lentement. À ce jour, le décompte des solutions a été mené jusqu'à $n=26$. Réussir ce décompte pour $n=27$ apparaît un défi difficile : on en est à $n=26$ depuis plus de cinq ans.

À défaut de connaître le nombre exact de solutions pour tout n , on essaie de minorer ce nombre, car il est intéressant de savoir (et de démontrer) que le nombre de solutions augmente très rapidement avec n . Quelques minoration sont connues et les raisonnements qui y mènent sont assez intéressants. Nous allons en présenter un et expliquer comment plusieurs mathématiciens ont été piégés et ont proposé de faux raisonnements repris parfois sans vérification dans la littérature sur le sujet. Auparavant, présentons la méthode pour obtenir

Une solution pour tout entier $n \geq 4$

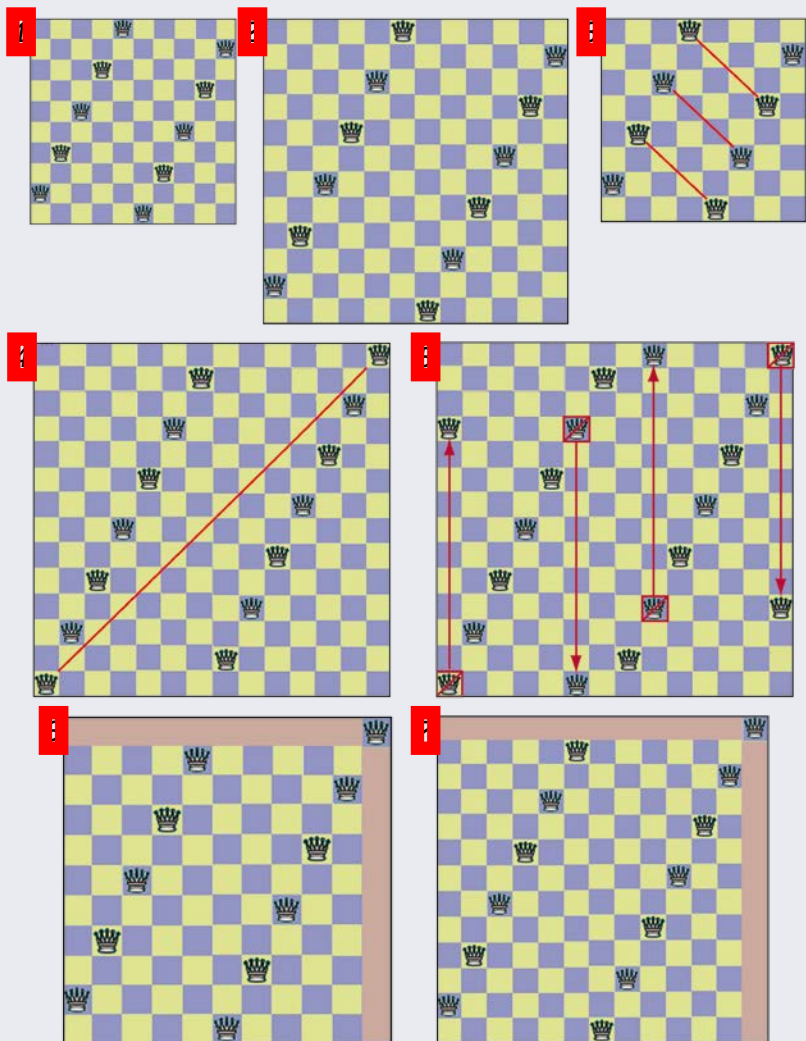
Pour montrer que le problème des n reines a au moins une solution pour tout entier $n \geq 4$, il n'y a pas besoin d'ordinateur : il suffit de réfléchir. En plaçant des reines selon deux lignes obliques.

de la forme $6m+4$ (échiquier 1, $n=10$), où m est un entier positif ou nul, et de la forme $6m$ (échiquier 2, $n=12$), mais pas quand n est de la forme $6m+2$ (échiquier 3, $n=8$).

Il faut traiter à part le cas où n est de la forme $6m+2$. C'est assez facile :

on part de deux lignes obliques de reines (échiquier 4), puis on déplace 4 reines (échiquier 5).

Lorsque n est impair, la solution se déduit des solutions trouvées pour le cas où n est pair : on reprend les solutions pour les cas pairs en ajoutant une reine en haut à droite sur l'échiquier agrandi d'une ligne et d'une colonne (échiquiers 6 et 7).



au moins une bonne configuration pour chaque entier $n \geq 4$.

Pour trouver une solution pour n quelconque, l'idée la plus simple, proposée dès 1874 par Emil Pauls, est de disposer les reines régulièrement selon un double parcours rectiligne de cavalier, en s'arrangeant pour qu'il y ait une reine sur chaque ligne et une sur chaque colonne.

La méthode est parfaite (voir échiquiers 1 et 2 de l'encadré page 79) pour tout entier n multiple de 6 (c'est-à-dire $n = 6m$ où m est un entier), et pour tout n supérieur de 4 unités à un multiple de 6 (c'est-à-dire $n = 6m + 4$). Pour les nombres pairs supérieurs de 2 unités à un multiple de 6 (soit $n = 6m + 2$), la méthode ne convient pas à cause des diagonales (voir échiquier 3). Un autre schéma un peu plus compliqué permet de s'en tirer (voir échiquiers 4 et 5). On a donc une solution pour tout entier pair supérieur ou égal à 4.

Pour les nombres impairs, soit $n = 2m + 1$, on prend une solution pour le nombre pair inférieur d'une unité, soit $2m$, on la place dans le coin en bas à gauche de l'échiquier de côté $2m + 1$, et l'on ajoute une reine dans le coin en haut à droite (voir échiquiers 6 et 7).

Le problème (i) de trouver une solution pour tout entier $n \geq 4$ est donc résolu... sans avoir utilisé d'ordinateur. Disposer d'une solution, c'est très bien, mais les connaître toutes ou réussir à les compter, ce serait encore mieux. À moins d'une découverte mathématique, l'ordinateur semble cette fois indispensable.

Des ruses pour chercher toutes les solutions

Nous allons envisager trois façons de plus en plus « intelligentes » de rechercher toutes les solutions pour une valeur donnée de n . Cette progression de la puissance quand on améliore les méthodes illustre l'idée qu'en informatique, un programme peut être juste et fonctionner parfaitement pour les petites valeurs d'un paramètre, et pourtant être inefficace car conduisant à des temps de calcul irréalistes (des années, des siècles ou plus !) quand le paramètre augmente.

On commence par écrire un sous-programme qui, quand on lui donne une configuration quelconque de n reines, indique si oui ou non elle est satisfaisante. Un tel sous-programme est facile à concevoir, car deux dames en positions (a, b) et (a', b') sur l'échiquier de côté n (où a, a', b, b' varient de 1 à n) sont en prise l'une avec l'autre si et seulement si $a = a'$ (elles sont sur la même ligne) ou $b = b'$ (même colonne) ou $a - b = a' - b'$ (même première diagonale) ou $a + b = a' + b'$ (même seconde diagonale).

La première idée pour calculer toutes les solutions pour n donné consiste à placer n reines de toutes les façons possibles et pour chaque configuration, d'utiliser le sous-programme qui indiquera si la configuration est solution ou non. Il y a n^2 choix possibles pour la première reine, n^2 choix pour la deuxième, etc., jusqu'à la n -ième. Le nombre de configurations à tester est donc exactement $(n^2)^n = n^{2n}$, ce qui, pour $n = 8$, fait environ $2,815 \times 10^{14}$.

La deuxième idée consiste à remarquer que toute solution s'obtiendra en plaçant une reine par colonne, et qu'on peut même s'arranger pour que les reines placées ne soient pas sur les lignes déjà occupées au moment où on les place. Il y a ainsi n façons de placer la première reine dans la première colonne, $n - 1$ façons de placer la deuxième reine sur la deuxième colonne, $n - 2$ façons de placer la troisième reine sur la troisième colonne, etc.

Cela conduit donc à tester en tout $n!$ configurations de n reines. On les teste une à une avec le sous-programme décrit plus haut, qui peut d'ailleurs être simplifié puisque, par construction, les configurations qu'on lui soumet maintenant sont correctes pour les contraintes de lignes et de colonnes. Le gain entre la première méthode et la seconde est considérable. Pour $n = 8$, il n'y a plus que 40 320 configurations à tester, soit environ 7 milliards de fois moins qu'avec la première méthode !

On peut encore faire mieux. La troisième méthode consiste à remarquer que lorsqu'on place les reines une à une comme dans la deuxième méthode, on peut s'apercevoir rapidement qu'on est en train de construire une configuration qui échouera. Si par

exemple on a placé une reine en $(1, 1)$, puis la seconde en $(2, 2)$, elles sont sur la même diagonale : il faut donc cesser de construire cette configuration qui ne donnera jamais de solution, quelles que soient les reines qu'on y ajoutera. Découvrir le plus tôt possible deux reines en prise dans l'énumération ordonnée de toutes les possibilités et remettre en cause le choix qui y a conduit est ce qu'on nomme la méthode de *backtracking*, ou retour arrière. Elle est d'usage courant dans de nombreux problèmes combinatoires.

Le gain obtenu par rapport à la seconde méthode est encore très intéressant et augmente avec n . Si l'on compte comme un essai une position où soit on a réussi à trouver une solution, soit on a découvert qu'il sera impossible d'aller plus loin, alors on trouve les 92 solutions pour $n = 8$ en 13 756 essais. Cela correspond à trois fois moins d'essais qu'avec la deuxième méthode. Pour $n = 12$, on n'effectue que 9 261 880 essais au lieu de $12! = 479\,001\,600$ avec la deuxième méthode ; on a donc gagné un facteur 50. Notons que la seule façon de connaître le nombre d'essais par la troisième méthode est de l'appliquer complètement, car on ne connaît aucune formule simple donnant ce nombre.

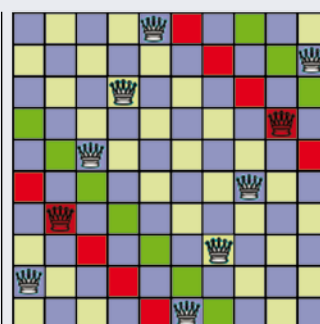
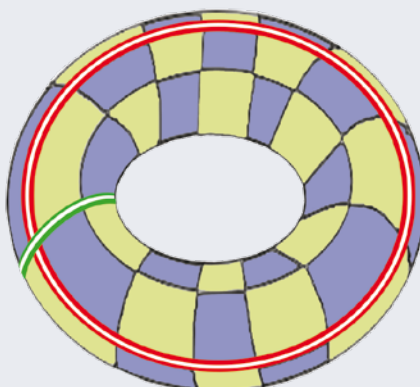
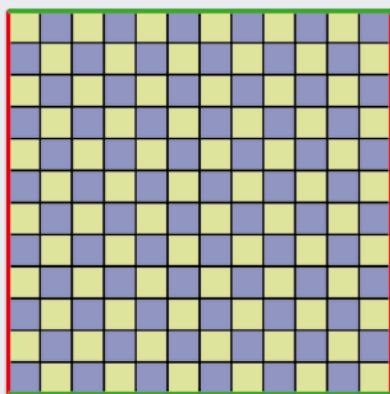
Le record : 26 reines

Il se trouve cependant que pour battre les records, il faut non seulement utiliser une bonne méthode, donc une variante du *backtracking*, mais aussi :

- la programmer très soigneusement ;
- faire exécuter en parallèle les calculs (ce qui n'est pas difficile ici car la méthode s'y prête bien) ;
- fabriquer et utiliser des puces spécialisées qui iront plus vite que les processeurs généraux pour l'exécution des calculs.

C'est ainsi que fonctionne le système informatique aujourd'hui détenteur du record pour $n = 26$. Ce record est détenu par l'université technique de Dresde (projet Queens@TUD), en Allemagne. Les chercheurs ont conçu une méthode massivement parallèle utilisant des circuits FPGA (*field-programmable gate array*) adaptés à ce

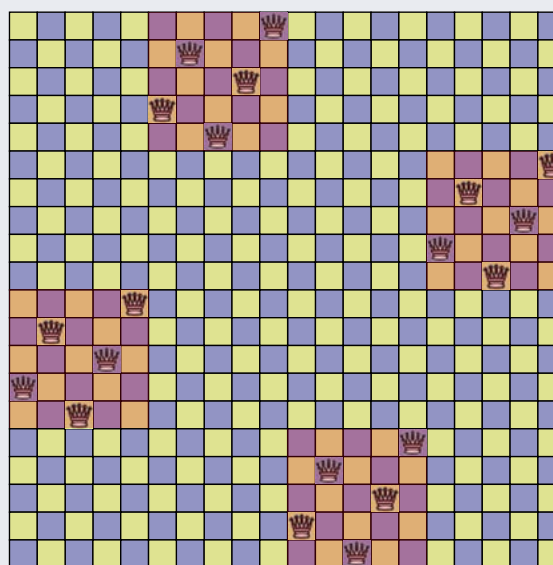
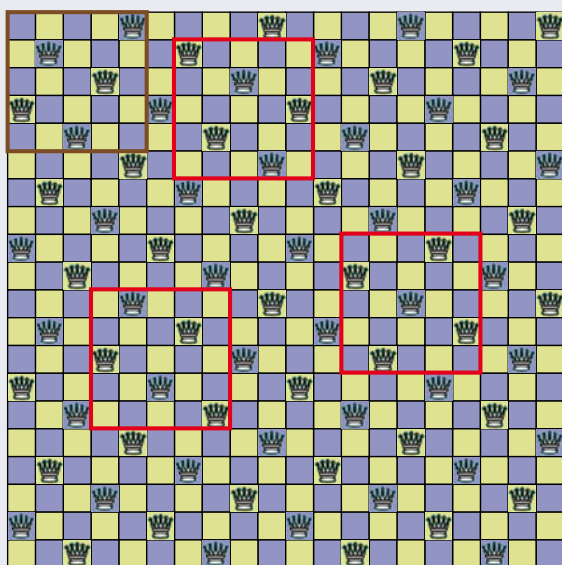
Le problème torique et ses prolongements plans



A. Partant d'un échiquier de côté n en caoutchouc, on colle le bord droit avec le bord gauche (*en rouge*). On obtient un échiquier cylindrique. On colle alors les deux extrémités du cylindre (*bords verts*), ce qui donne un tore. Les diagonales du carré initial se sont rejointes et il y a maintenant n dans chaque sens, chacune ayant n cases.

C. Cette solution au problème plan des 12 reines n'en est pas une pour le problème torique : la diagonale rouge contient deux reines (ici, la diagonale verte n'en contient aucune).

B. La diagonale rouge de cet échiquier torique contient deux reines. Cette solution au problème plan des 4 reines n'est donc pas une solution pour le problème torique.



D. Pour $n=5$, le problème torique a 10 solutions (l'une d'elles est représentée, avec un cadre marron). Une solution du problème torique des n reines permet d'en obtenir beaucoup d'autres : en pavant le plan par des carrés solutions du problème torique des n reines et en extrayant un carré $n \times n$ n'importe où dans le plan ainsi pavé, on obtient une autre solution du problème torique (cadres rouges).

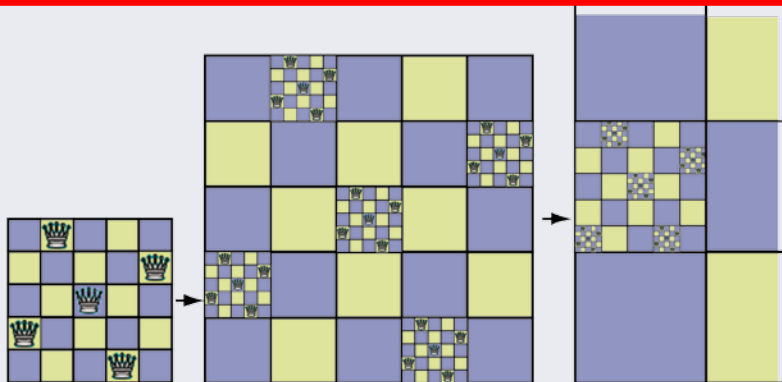
E. La « composition » d'une solution plane des 4 reines avec une solution torique des 5 reines fournit une solution au problème plan des 20 reines. En « composant » ainsi les solutions du problème torique des n reines avec des solutions du problème plan des m reines, on obtient un grand nombre de solutions au problème plan des $n \times m$ reines.

Une infinité de solutions infinies

La méthode de composition des solutions donne aussi la démonstration qu'il existe des solutions au « problème infini des reines ». Ce problème consiste à placer des reines sur un échiquier infini de sorte qu'il y en ait une par ligne et une par colonne, et qu'aucune ne soit sur la même diagonale parallèle à la droite $y = -x$.

On procède progressivement : du problème torique des 5 reines, on prend la solution ayant une reine en son centre. On remplace chaque reine par la configuration elle-même et l'on subdivise les autres cases). Cela donne une configuration convenable sur l'échiquier 25×25 . De plus, cette configuration prolonge la première, en ce sens qu'on peut la voir comme l'addition de 20 nouvelles reines aux 5 reines initiales. On répète la même opération, ce qui prolonge la solution qu'on a sur un échiquier 25×25 en une solution sur un échiquier 125×125 , puis sur un échiquier 625×625 , etc. À chaque fois, les nouvelles configurations sont compatibles avec les précédentes, ce qui autorise à « passer à l'infini », c'est-à-dire à considérer simultanément toutes les reines qui sont déposées d'étape en étape. On a la solution recherchée.

La méthode donne ici une seule solution au problème infini des reines, mais on l'adapte pour montrer qu'il existe une infinité de solutions différentes à ce problème, que cette infinité de solutions n'est pas dénombrable et qu'elle est de même cardinal que le continu : il y a autant de solutions au problème infini des reines que de points sur une droite !



calcul. Ce dernier a tout de même duré dix mois et s'est terminé le 11 juillet 2009. Il a abouti à 22 317 699 616 364 044 (22 millions de milliards) solutions au problème des 26 reines. Depuis, le résultat a été confirmé par un calcul effectué par des Russes, mais le dénombrement des solutions n'a pas été effectué pour 27 reines ou plus.

Notons que si l'on cherche non pas une ou toutes les solutions, mais seulement quelques solutions, par exemple une centaine, alors d'autres méthodes de programmation sont envisageables. L'une d'elles consiste à placer au hasard une reine par colonne, ce qui donne une configuration très probablement incorrecte. On corrige

ensuite celle-ci en déplaçant les reines une à une, de telle sorte qu'à chaque déplacement, le nombre de conflits (c'est-à-dire de couples de reines en prise) diminue. On sait, par ce type d'algorithmes, trouver rapidement des solutions pour $n = 100$ ou même $n = 1\,000$. Un algorithme quantique a aussi été présenté qui permettra peut-être de battre le record de $n = 26$... le jour où l'on disposera d'ordinateurs quantiques de taille respectable, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui.

Ceux que la programmation du problème intéresse trouveront une multitude de programmes traitant des n reines, écrits dans une grande variété de langages de

programmation, sur le site internet http://rosettacode.org/wiki/N-queens_problem.

À défaut de calculer le nombre exact de solutions pour tout n , on aimerait prouver que ce nombre augmente rapidement avec n (cela semble évident au vu des résultats connus de décompte jusqu'à $n = 26$). Nous décrivons une telle méthode, mais nous envisagerons d'abord une variante du problème des n reines introduite par le mathématicien d'origine hongroise George Pólya (1887-1985).

Pólya imagine un échiquier $n \times n$ dessiné sur un tore (la surface d'une chambre à air) (voir l'encadré page 81, A) et cherche des solutions au problème des n reines sur cet échiquier torique. Les contraintes sur les lignes et les colonnes ne changent pas. En revanche, pour les diagonales, cela se complique, car les diagonales se rejoignent désormais, comme si le bord droit était collé au bord gauche et le bord du haut au bord du bas (selon un principe souvent utilisé dans les jeux vidéo). Par conséquent, une configuration résolvant le problème des n reines sur l'échiquier normal n'est plus nécessairement une solution sur l'échiquier torique (voir les échiquiers B et C).

Des reines sur un échiquier torique

Pólya a établi qu'il ne pouvait exister de solutions à ce problème que si n est de la forme $6m + 1$ ou $6m - 1$ pour un certain entier m . Le nombre de solutions est donné par une suite $T(n)$ dont les premiers termes non nuls sont : $T(5) = 10$, $T(7) = 28$, $T(11) = 88$, $T(13) = 4\,524$, $T(17) = 140\,692$.

Propriété intéressante : si l'on dispose d'une solution torique et qu'on en pave tout le plan en utilisant le pavage habituel du plan par un carré, on obtient un dessin dont tout carré extrait de taille $n \times n$ est encore une solution torique du problème des n reines (voir l'échiquier D).

L'intérêt des solutions toriques est surtout qu'on peut les exploiter pour construire automatiquement une multitude de grandes solutions à partir de quelques petites. La méthode est visuelle : on prend une solution du problème plan des n reines (par problème plan, nous entendons le

problème habituel) et l'on remplace dans cette solution chaque reine par une solution du problème torique des m reines. Cela donne une configuration de reines sur l'échiquier de côté $n \times m$ qui est une solution au problème plan des $n \times m$ reines (les menaces qui auraient pu se produire en diagonale entre les différentes copies de la solution torique sont évitées par les diagonales allongées de l'échiquier torique).

Le nombre de solutions croît exponentiellement

La méthode de composition permet d'établir que le nombre de solutions au problème des n reines augmente exponentiellement avec n , ce que l'on a constaté jusqu'à $n = 26$, mais qu'il est bon de démontrer rigoureusement pour n tendant vers l'infini.

Voici un exemple de raisonnement. Puisqu'il y a 10 solutions au problème torique des 5 reines, en les combinant de toutes les façons possibles, l'une quelconque des 10 avec l'une quelconque des 10, on obtient 100 solutions au problème des 25 reines. Il est facile de s'assurer qu'elles sont différentes. En recommençant à partir de ces 100 solutions au problème des 25 reines, on obtient 1 000 solutions au problème des 125 reines, puis 10 000 solutions au problème des 625 reines, et, plus généralement, 10^m solutions au problème des 5^m reines. Pour les entiers n de la forme 5^m , on a donc 2^n fois plus de solutions que de nombre de reines. En partant de $T(7) = 28$, on aurait obtenu 28^n solutions au problème des 7^n reines, soit 4^n fois plus de solutions que de reines.

On a bien une démonstration que le nombre de solutions augmente très vite lorsque le nombre de reines est une puissance de 5. En fait, le nombre de solutions comparé au nombre de reines semble croître bien plus vite encore que ne l'indique notre démonstration.

Notons, avant d'en venir aux conjectures, que la méthode décrite permet de concevoir une solution sur l'échiquier infini : du problème torique des 5 reines, on prend la solution présentant une reine au centre et on la combine indéfiniment

avec elle-même, ce qui conduit à une solution (ayant une reine sur chaque horizontale, chaque verticale et même chaque diagonale) du plan infini (voir l'encadré page 82).

La conjecture qui semble la plus probable est que si l'on note $R(n)$ le nombre de solutions au problème des n reines, alors $\log R(n)/(n \log n)$ tend, quand n tend vers l'infini, vers une constante qui vaut à peu près 0,44438... Si c'est vrai, cela signifie que $R(n)$ augmente aussi vite que $n^{0,44438n}$. C'est beaucoup plus rapide que ce que nous avons su démontrer avec la méthode des solutions toriques de Pólya.

Signalons que certains mathématiciens se sont fait piéger en utilisant la méthode de composition. Ils ont pensé que l'on pouvait remplacer les reines de la solution plane par des solutions différentes du problème torique, ce qui est faux. La démonstration des minoration obtenues est donc fautive, bien que ces minoration soient reproduites dans divers articles, dont celui de Jordan Bell et Brett Stevens de 2009, très souvent cité (voir la bibliographie), où le Theorem 2 n'est en réalité qu'une conjecture.

D'autres jeux

Les échecs sont un jeu de raisonnement et intéressent donc de nombreux mathématiciens. Cependant, les problèmes d'échecs semblent un peu trop liés aux règles précises du jeu lui-même. Aussi les mathématiciens se sont-ils amusés à concevoir des énigmes combinatoires plus pures, tels le problème des n reines ou le tout aussi populaire problème du parcours du cavalier (faire circuler un cavalier de telle façon qu'il passe par chaque case de l'échiquier une fois exactement) qui a passionné Euler. Ce ne sont pas les seules. Les livres de John Watkins ou l'énorme mémoire gratuit (en anglais et en tchèque) de Václav Kotěšovec en mentionnent un grand nombre (voir la bibliographie). Ces problèmes ont stimulé le développement de la théorie des graphes et resteront longtemps une source précieuse de défis informatiques et mathématiques.

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

R. Spallek, The world record by PGAs, 2015 : <http://queens.infu-dresden.de/?n=0&l=en>

Rosetta Code, N-queens problem, 2015 : <http://rosettacode.org/wiki/N-Queens>

V. Kotěšovec, Non-attacking chess pieces, 2013 téléchargeable sur le site <http://www.kotesovec.cz/>

J. Bell et B. Stevens, A survey of known results and research areas for n-queens, *Discrete Mathematics*, vol. 309(1), pp. 1-31, 2009 (attention, Theorem 2 n'est en fait qu'une conjecture).

J. J. Watkins, Across the Board : The Mathematics of Chessboard Problems, Princeton University Press, 2007.

J. Rivin et al., The n-queens problem, *Amer. Math. Monthly*, vol. 101(7), pp. 629-639, 1994 (attention, le théorème 2 et son corollaire sont faux).

P. Campbell, Gauss and the eight queens problem : A study in miniature of the propagation of historical error, *Historia Mathematica*, vol. 4(4), pp. 397-404, 1977.



Retrouvez la rubrique logique & calcul sur www.bourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Quel animal roule comme Sonic et BB-8 ?

L'homme a inventé la roue, mais le principe semble beaucoup moins répandu dans la nature. À quelques exceptions près, les animaux qui roulent sont tous imaginaires.

Roland Lehoucq et Jean-Sébastien Steuer. Illustration : Marc Boulau

Le *hoopsnake* (serpent-cerceau) est l'une des plus fameuses bestioles du folklore américain du début du XIX^e siècle. Selon la légende, ce serpent pouvait, à la manière de l'Ouroboros de la mythologie grecque, attraper sa queue avec sa gueule pour former un anneau lui permettant de se déplacer à grande vitesse en roulant. Doté d'un aiguillon venimeux, le seul moyen d'échapper à ce dangereux serpent était de sauter à travers l'anneau qu'il formait, ce qui le désorientait et le rendait incapable de faire demi-tour. On trouverait le *hoopsnake* dans diverses régions d'Amérique du Nord et aussi une variété dans les grands espaces australiens. Inutile de préciser que l'existence de cet étrange serpent n'a jamais été démontrée.

Mais existe-t-il des animaux qui roulent en utilisant soit leur corps entier, soit des parties mobiles, des « roues », ou cela est-il l'apanage des animaux imaginaires ? Ces derniers sont nombreux. L'artiste hollandais M. C. Escher, sur une lithographie de 1951 intitulée *Wentelteefje* (*Curl-up* en anglais), a représenté *Pedalternorotandomovens centrocylatus articulatus*, une bête fictive, articulée et hexapode qui s'enroule sur elle-même puis se met à rouler. Dans un autre domaine, Sonic – le hérisson de la série de jeux vidéo éponyme, développée par la firme japonaise Sega depuis 1991 – se déplace en roulant très rapidement sur lui-même.

Ce déplacement par roulage est très apprécié des enfants et des gymnastes.



DANS L'ÉPISODE 7 DE STAR WARS, le robot BB-8, composé d'un corps sphérique surmonté d'une tête en lévitation magnétique, roule en modifiant la position de son centre de gravité ; ce qu'il fait en déplaçant ses composants internes.

mais peu d'humains adultes l'utilisent. En revanche, certains organismes allongés sont capables de déformer leur corps pour former une boucle et, éventuellement, de rouler. C'est le cas de la chenille, du myriapode, de la crevette-mante et de la salamandre. D'autres adoptent une posture plus proche de la sphère, tels le pangolin et le tatou (qui se protègent aussi en se roulant en boule), le lézard d'Armardille (dont le nom savant *Ouroborus cataphractus* évoque l'Ouroboros), l'isopode et la dame blanche, une araignée de Namibie qui dévale les dunes en roulant sur elle-même. Ces espèces peuvent rouler passivement, en utilisant la gravité par exemple, ou activement, en déformant leur corps pour modifier la position de leur centre de gravité. On retrouve ce mode de locomotion chez le robot TARS du film *Interstellar* (Christopher Nolan, 2014).

Les plantes ne sont pas en reste, comme le montrent la plupart des graines et le virevoltant, bien connu des amateurs de westerns. Il s'agit d'un ensemble de tiges ramifiées qui, une fois sèches, se détachent de la racine de certaines plantes des déserts du sud des États-Unis. Sa forme à peu près sphérique lui permet de rouler au gré du vent et de répandre ses graines.

Le mouvement de rotation pourrait se limiter à une partie du corps, telle la roue autour d'un axe. En dépit de l'ubiquité de la roue dans les véhicules humains, aucun organisme terrien ne semble l'avoir adopté. Une des rares structures biologiques



LE DESCENDANT IMAGINAIRE du pou
les baleines aurait la capacité de se mettre
en boule pour se protéger des prédateurs.

rotatives qui s'en rapprochent est le flagelle de certaines bactéries. Chez les procaryotes, un moteur moléculaire situé sur l'embase du flagelle assure sa rotation. Ce système fournit un couple propulsif à un corps fixe, à la manière de l'hélice d'un navire. Et le système est plutôt efficace, car la vitesse de déplacement de la bactérie peut atteindre soixante longueurs corporelles par seconde. À peu près la moitié des bactéries disposent d'au moins un flagelle, indiquant que l'hélice a probablement plus de succès que la roue.

Le plus grand obstacle anatomique à l'existence d'organismes multicellulaires à roues est l'interface entre les parties statique et rotative. Contrairement aux articulations, qui ont une liberté de mouvement limitée, une roue doit être capable de tourner librement d'un angle arbitraire par rapport au reste de l'organisme.

L'interface entre la roue et son axe pose problème : si elle est constituée de tissu vivant, il faut la « nourrir », en oxygène et en nutriments. Le réseau vasculaire habituel ne peut convenir, car il aurait besoin d'être « déroulé » de temps en temps, afin d'éviter d'être endommagé par la torsion due à la rotation de la roue. La même difficulté s'applique à l'éventuel système nerveux qui contrôlerait le mouvement et la vitesse de la roue. L'alimentation de la roue, elle, pourrait être transmise par diffusion, mais c'est un processus très lent. Pour s'en sortir, il faudrait que la roue soit constituée de matière presque inerte, excrétée par le corps

de l'animal, comme nous le faisons avec la kératine de nos ongles ou de nos cheveux.

Par ailleurs, dans la plupart des environnements terrestres, la roue présente d'autres désavantages, comparée à des membres articulés. Si la roue est très efficace pour se déplacer sur un terrain nivelé et dur, comme une route pavée, elle n'est pas vraiment adaptée à un terrain souple, déformable ou accidenté. Elle devient alors sujette à une forte résistance à l'avancement à cause des frictions engendrées par la déformation du sol sur lequel elle se déplace. De plus, alors que la roue interagit avec le sol sur l'ensemble de sa surface, des pattes ou des pieds ne sont en contact avec lui que sur un ensemble de petites zones localisées, ce qui limite les pertes d'énergie.

La roue moins efficace que les pattes articulées

Sur les sols les plus déformables engendrent bien sûr les résistances les plus grandes : elle est ainsi cinq à huit fois moins efficace de rouler sur un sol souple que sur une surface en béton. Et c'est encore deux à trois fois pire sur du sable. Cela explique pourquoi le transport des marchandises se faisait avec des chariots à roues dans les régions de l'Empire romain bien équipées en routes en dur, alors que les caravanes de dromadaires étaient bien plus efficaces dans les déserts du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord.

Les roues sont également mal adaptées au franchissement d'obstacles, surtout ceux ayant une hauteur comparable à leur taille. Si l'animal ou le véhicule peut se déformer pour déplacer son centre de masse, la hauteur limite que peut franchir une roue passive (c'est-à-dire non propulsée) est égale à son rayon. Sans déformation possible, cette limite est comprise entre un quart et la moitié du rayon. C'est pourquoi les roues destinées aux terrains accidentés sont plus grandes. De plus, un véhicule non articulé peut se retrouver coincé au sommet d'un obstacle laissant ses roues tourner dans le vide. Le risque de retournement est aussi non négligeable : il suffit que la projection au sol du centre de masse du véhicule sorte de ses points d'appui, ce qui peut arriver en porte-à-faux. À l'inverse, les pattes sont bien plus efficaces pour se déplacer en toutes circonstances.

Avec toutes ces difficultés, on comprend aisément pourquoi la vie multicellulaire n'a pas exploré la possibilité de se déplacer sur une ou plusieurs roues, et pourquoi la sélection naturelle n'a pas retenu un tel dispositif. Étant donné les désavantages de la roue, on se pourrait même que la bonne question ne soit pas : « pourquoi la nature n'a-t-elle pas inventé la roue ? », mais plutôt : « pourquoi les véhicules humains n'utilisent-ils pas des pattes articulées ? ».

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. J.-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris.
Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

Et en Amazonie coule la Seine...

Une toile géante, présentée à 360°, permet d'explorer la forêt amazonienne sans y aller. Le spectateur est plongé dans un panorama spectaculaire où lui sont donnés à voir différents types de forêts tropicales. Un art grandeur nature !

Loïc MANGIN

Par les temps qui courent, ce serait bien compréhensible, vous avez peut-être envie d'évasion, d'un grand bol de nature. La forêt amazonienne est un des endroits idéaux pour une échappée belle. Trop loin ? Une solution d'échange est disponible : l'exposition présentée au Panorama XXL, à Rouen, sur les quais de la Seine. De quoi s'agit-il ? D'*Amazonia*, une toile immense, de 31 mètres de hauteur et 101 de longueur, disposée en cylindre de façon à offrir une vue à 360°. Les plus de 3 000 mètres carrés de l'œuvre, que l'on doit à l'artiste d'origine iranienne Yadegar Asisi, offrent une immersion complète en forêt tropicale... sans avoir besoin de s'envoler pour l'Amérique du Sud !

Le public est invité à gravir une

structure centrale pour contempler, de trois hauteurs différentes, le foisonnement de la végétation peuplée de plusieurs dizaines d'espèces animales que l'on peut débusquer à l'aide de quelques jumelles disséminées sur les balustrades. Le détail est tel que l'on peut repérer jusqu'à une chenille déambulant sur le sol.

Pour mieux renforcer l'illusion, la lumière crée une alternance du jour et de la nuit et même, aidée par une bande sonore adéquate, un épisode d'orage. Dans la phase d'obscurité, des éclairages ultraviolets font briller les zones blanches de la toile donnant ainsi l'impression d'un clair de lune sous des frondaisons.

Comment s'y est pris l'artiste ? Pour *Amazonia*, il a séjourné à quatre reprises au Brésil, et s'est entouré des conseils de deux botanistes, d'abord Wilfried Morawetz, responsable du jardin botanique de Leipzig, puis Dietmar Satter. Yadegar Asisi est revenu avec des milliers de photographies et de nombreux croquis. Il a ensuite composé sur ordinateur son œuvre mixte, où les photographies correspondent à environ 70 % du total, puis l'a fait imprimer en Allemagne, par bandes de 3 mètres sur 30.

L'œuvre de 3 000 mètres carrés offre une immersion complète en forêt amazonienne... sans avoir besoin de s'envoler pour l'Amérique du Sud !

Il a souhaité rendre compte de la diversité de la forêt amazonienne, un milieu qui n'est pas homogène. En effet, d'abord, elle se répartit sur plusieurs étages, du sol jusqu'à la canopée. Ensuite, elle est un assemblage complexe de plusieurs types de végétation.

Citons la varzea, une forêt inondée par des crues de plusieurs mois, la terra firme, c'est-à-dire la forêt de plaine qui reste les pieds au sec, ou bien la forêt d'altitude qui s'étend sur les contreforts des Andes jusqu'à 3 000 mètres d'altitude. Tous ces écosystèmes, ainsi que différents points d'eau (cascades, ruisseaux, marais...), figurent dans le panorama où les arbres sont représentés à taille réelle.



Rendez-vous

Dans cette végétation luxuriante se cachent de nombreuses espèces animales : les paresseux, des jaguars, des ocelots, des aras, des alligators, des singes hurleurs, des papillons, des grenouilles dendrobates, des fourmis coupe-feuilles, des tapirs et même quelques humains.

Un œil attentif peut également repérer ce qui s'apparente à des plaisanteries. Par exemple, l'espèce d'un oiseau bariolé reste à ce jour indéterminée. Sur une branche, on distingue deux condors loin de leurs sommets habituels. Enfin, plusieurs opossums et tantinet moqueurs émergent de-ci de-là.

En repartant, après vous être perdu dans ce tableau géant, regardez de près la toile. Vous pourrez déceler deux artifices qui ont aidé à vous faire voyager en un instant, juste en grimpant quelques marches.

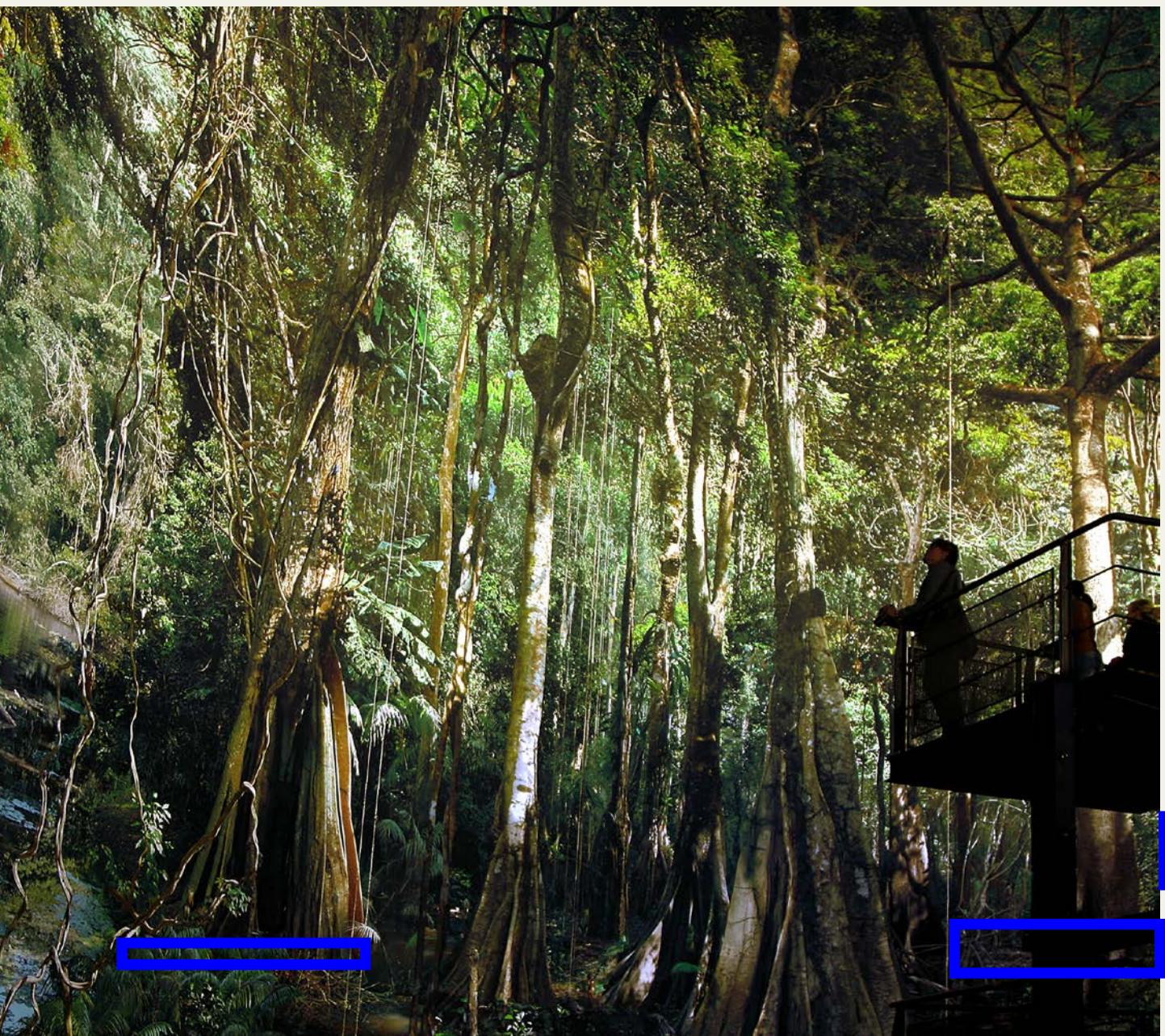
D'abord, l'œuvre a été en partie construite à la façon des anamorphoses cylindriques, où un dessin qui apparaît déformé à l'extrême sur une feuille de papier ne se révèle que dans son reflet sur un miroir en cylindre.

De même, certaines zones, notamment les plans d'eau, sont représentées vues du dessus alors que les plantes, les arbres, les touffes... situés juste à côté, sont vus de

face. En gros plan, l'assemblage déroute, mais une fois en hauteur, sur la structure centrale, l'illusion fonctionne et donne de la profondeur, de la perspective, à l'ensemble.

Amazonia perpétue une tradition qui date de la fin du XVIII^e siècle, quand l'Écossais Robert Barker créa le premier panorama à Édimbourg. Le principe, aidé par les techniques du numérique, connaît une nouvelle jeunesse depuis le début du XXI^e siècle. Il permet de voyager sans (trop) se déplacer !

amazonia, du 26 septembre 2015 au 22 mai 2016, Panorama XXL, Quai de Boisseuilbert, Rouen



**C'EST
POUR
VOUS**
france
culture

LA MARCHÉ DES SCIENCES

DÉCOUVERTES INVENTIONS AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE

AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
14H - 15H



en partenariat avec **POUR LA
SCIENCE**

écoutez, réécoutez, podcast
franceculture.f



IDÉES DE PHYSIQUE

Petite force deviendra grande

Le jeu des forces de frottement et de la courbure des surfaces en contact donne lieu à des mécanismes d'amarrage très efficaces, avec des cordes... ou des feuilles de papier.

Jean-Michel Courtu et Édouard Kierlik

Armons-nous de patience et rassemblons deux annuaires en intercalant les feuilles de l'un avec celles de l'autre. Si on serre fortement leurs reliures, il devient impossible de séparer les deux bottins. Mieux encore, ils sont assez solidaires pour supporter le poids d'une voiture (voir la figure ci-dessous) !

Suffit-il de multiplier par le nombre de pages la faible force de frottement entre deux feuilles de papier pour expliquer le phénomène ? Avec plusieurs collègues, Frédéric Restagno, physicien du CNRS à l'université Paris-Sud, vient de montrer que cette interprétation et bien d'autres qui circulent sur la Toile sont erronées : l'explication réside dans un processus d'amplification mécanique, identique à celui en jeu dans la solidité des nœuds ou le principe du nœud de cabestan.

Un frottement amplifié

D'après un dicton breton, « un tour mort et deux demi-clés n'ont jamais lâché ». Ce nœud d'amarrage facile à réaliser consiste à enrouler la corde autour d'un mât ou d'une poutre (le « tour mort ») et à bloquer l'ensemble par l'enlacement nommé demi-clé (voir la figure page 90, en haut). On peut constater que dans la corde, la tension chute tout au long de l'enroulement, si bien qu'avec uniquement un « tour mort », une force de maintien faible, exercée à un bout par un marin, permet de résister à une forte traction sur l'autre bout, telle celle d'un bateau au mouillage.

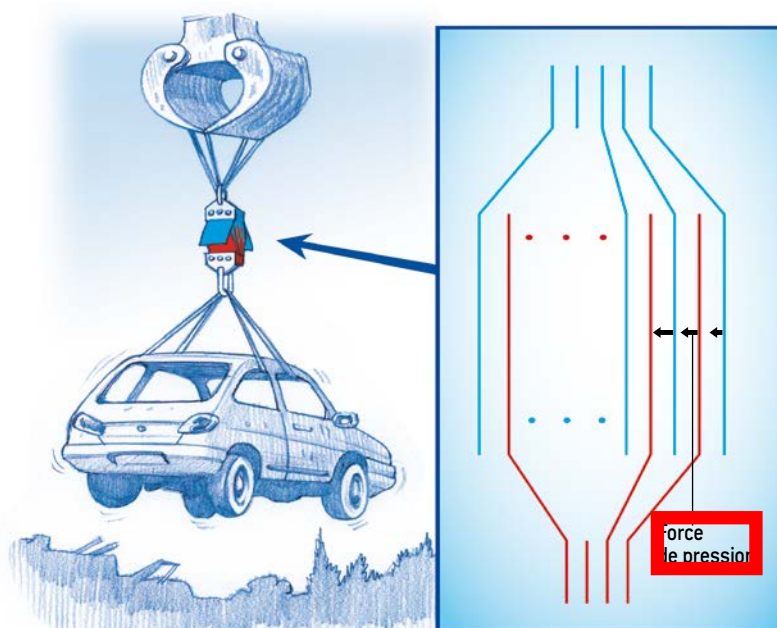
Pour comprendre cette réduction de la tension, analysons les forces qui s'exercent sur un petit élément de la corde au contact du mât cylindrique autour de laquelle il est enroulé. Cet élément de corde subit une tension en amont (du côté sous traction) et une tension en aval (du côté du marin).

En raison de la courbure de l'élément de corde, ces deux forces de tension ne sont pas parallèles. Par conséquent, l'élément de corde exerce une pression sur le mât, et réciproquement : en vertu des lois du frottement solide, cet élément peut supporter une

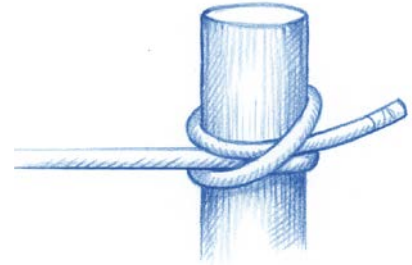
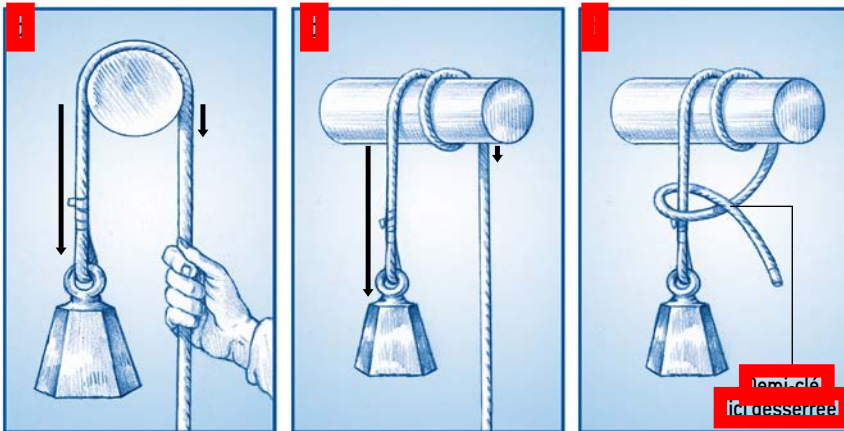
différence de tension à ses extrémités, à condition toutefois que l'écart soit inférieur à la force pressante multipliée par un « coefficient de frottement statique » μ , nombre qui est de l'ordre de 1.

Répétons ce raisonnement pour chacun des éléments successifs de la corde en contact avec le support. On en conclut que tant qu'il n'y a pas glissement de la corde, la tension diminue le long du cordage en direction de la main qui le maintient.

Plus précisément, on peut montrer que dans le cas où la corde est à la limite de glisser



DEUX ANNUAIRES ENTRELACÉS et serrés au niveau de leur reliure constituent un lien très solide, comme en atteste une expérience réellement faite avec une voiture. En raison de la courbure, chaque feuille exerce sur la suivante une pression croissante. Il s'ensuit que la somme des forces de frottement entre les feuilles augmente exponentiellement avec le nombre de feuilles.



UN NŒUD DE CABESTAN, utilisé par exemple pour fixer définitivement l'extrémité d'un cordage. Autobloquant, il ne s'ouvre pas spontanément.

PARTOUT OÙ LA CORDE EST EN CONTACT avec le cylindre, une force de frottement peut agir. Grâce à son accumulation, la force (flèche de droite) que la main doit appliquer pour empêcher la corde de glisser sous l'effet du poids accroché (flèche de gauche) est minime (a). Avec un enroulement assez long, le maintien peut être assuré par une « demi-clé », enlacement où le frottement suffit à produire la force nécessaire (b, c).

cette diminution est exponentielle : on calcule que le rapport entre la force de traction et la force de maintien est égal à $e^{2\pi\mu n}$, où n est le nombre de tours de la corde autour du mât. Avec un coefficient de frottement banal, $\mu = 0,5$, ce rapport est donc d'environ 5 pour un demi-tour, 25 pour un tour complet et 125 pour le tour mort (un tour et demi) !

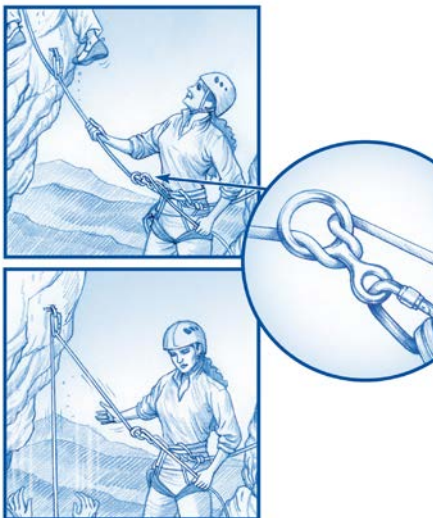
Le résultat est spectaculaire, mais le marin doit tirer au moins un peu : s'il lâche le cordage, la tension s'annule à un bout de la corde et celle-ci se met à glisser. C'est pourquoi on verrouille le tour mort en réalisant une, voire deux, demi-clés. Il s'agit d'un nœud simple de l'extrémité libre autour de la corde sous tension ; la force de maintien résulte alors naturellement des frottements entre les différentes parties de la corde.

Ce nœud est efficace et facile à défaire rapidement, c'est-à-dire idéal pour l'amarrage d'un bateau. En revanche, pour des fixations plus définitives, on lui préfère le nœud de cabestan. Dans ce nœud, la partie centrale de la corde s'enroule au-dessus des brins qui s'éloignent en amont et en aval du mât.

La configuration est autobloquante : une fois que la partie centrale est mise sous tension, elle appuie sur les brins sortants et les empêche de glisser. Ainsi, lorsqu'on relâche les extrémités de la corde, le nœud demeure sous tension. C'est idéal pour la construction d'une cabane en bois ; mais le nœud de cabestan devient de plus en plus difficile à défaire au fil du temps.

La diminution exponentielle de la tension est aussi utilisée par les amateurs d'escalade

pour l'assurage, notamment dans le dispositif nommé huit (voir la figure du bas). Il s'agit d'une pièce métallique en forme de huit où l'on fait passer la corde sans faire de nœud. Si l'on met cette corde sous tension, en général le brin qui passe par la main gauche pour assurer un coéquipier ou lors d'une descente en rappel, le frottement sur le métal du huit réduit suffisamment la tension pour que la main droite tenant le brin libre puisse le retenir à l'aide d'une force modérée, et cela même si la tension devient très importante à la suite d'une chute.



LE HUIT D'ESCALADE est un dispositif permettant à une personne d'assurer son coéquipier. La corde glisse aisément lorsque ce dernier monte, mais, en cas de chute, sa collègue le retient facilement en exerçant sur la corde une force modeste

Des bottins inséparables

De façon étonnante, on retrouve une variation de ce mécanisme, cette fois amplifiée, dans les travaux récents de Frédéric Restagno et ses collègues sur les annuaires entrelacés. On peut s'en convaincre en réalisant chez soi l'expérience suivante avec un jeu de cartes. On coupe le paquet en deux et on intercale une à une les cartes des deux paquets dans leur longueur de telle sorte qu'elles se recouvrent parallèlement sur les deux tiers environ (mélange dit pharaon, pour les amateurs). Si l'on tient les paquets par les côtés (leurs tranches latérales), il est très facile de les désimbriquer en tirant dessus dans le sens de la longueur. En revanche, si l'on tient ces paquets en pinçant fort leurs extrémités, il devient presque impossible de les séparer.

Dans les deux cas (cartes ou feuilles d'annuaires), l'origine du phénomène est à rechercher dans la flexion des feuillettes

successifs. Cette flexion est inévitable, car il y a dans le cas des bottins deux fois plus de feuilles empilées dans la zone d'intercalation qu'au niveau des reliures, et dans le cas des cartes l'épaisseur est moindre là où les paquets sont pincés. Cette flexion des feuillets transfère une partie de la force de tension en leur sein en force de compression les uns sur les autres et induit un couplage de même nature que celui à l'œuvre entre la corde et le mât.

Raisonnons sur l'exemple du jeu de cartes. Que se passe-t-il pour la première carte du paquet ? Comme elle est légèrement pliée vers le bas, à cause de sa rigidité, elle appuie légèrement sur la carte décalée au-dessous d'elle. Grâce à cette force pressante, cette deuxième carte peut, par le frottement, résister à une petite force de séparation longitudinale. La zone de pincement étant plus mince que la zone de recouvrement, la force de frottement est légèrement inclinée

par rapport au plan (longitudinal) des cartes superposées : elle contribue donc à appuyer un peu plus sur la carte suivante (parallèlement à la première).

Et ainsi de suite, chaque feuillet subit une pression plus importante que la précédente, ce qui lui permet de résister à une force de séparation plus importante. La résultante de toutes les forces de frottement s'exerçant sur les feuilles est alors considérable. Les expériences réalisées par Frédéric Restagno avec des nombres variés de feuillets de papier maintenues par une mâchoire faisant office de reliure illustre de façon spectaculaire le caractère amplificateur de l'empilement : en multipliant par 10 le nombre de feuilles, la force de séparation supportée est multipliée par 10 000 !



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

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY
et Édouard KIERLIK
sont professeurs
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

BIBLIOGRAPHIE

H. Alarcón et al., The enigma of the two interleaved phonebooks, *Phys. Rev. Lett.*, à paraître
prépublication : arxiv.org/abs/1508.03290

les conférences

entrée libre dans la limite des places disponibles

À la Cité des sciences et de l'industrie

cycle La dynamique des gènes

Les mardis 12, 19 et 26 janvier à 19h

Avec Déborah Bourchis, directrice de recherche à Inserm ; Alain Fischer, médecin, chercheur, professeur au Collège de France ; Thomas Heams, biologiste.

Au Palais de la découverte

cycle Dinosaures : des acteurs qui en imposent !

Les samedis 9, 16, 23 et 30 janvier à 15h

Avec Ronan Allain, Damien Germain, Sandrine Ladevèze, Jean-Sébastien Steyer, paléontologues au Muséum national d'histoire naturelle

Programme complet sur cite-sciences.fr et palais-decouverte.fr

avec le soutien de

SCIENCE L'EXPRESS Slate.fr culture plus

QUESTION AUX EXPERTS

Pourquoi les hommes ont-ils des tétons ?

Parce que les tétons sont utiles aux femmes pour l'allaitement et que ce caractère a été sélectionné au niveau de l'espèce.

Andrew SIMONS



« La poitrine des hommes aurait l'air plutôt bizarre avec seulement des poils », me disait récemment ma fille de 4 ans, qui justifiait ainsi l'existence des tétons masculins. Certes. Mais essayons d'aller plus loin. L'utilité de ces attributs étant bien moins évidente que celle de leurs homologues féminins, qu'est-ce qui justifie leur existence ?

Les biologistes évolutionnistes, dont le rôle consiste à expliquer la diversité des formes naturelles, sont souvent tenus de fournir des explications adaptatives : tel caractère est apparu parce qu'il a favorisé l'adaptation de l'animal à de nouvelles conditions, c'est-à-dire qu'il a augmenté ses chances de reproduction ou de survie. Et en effet, on montre par des expériences appropriées que certains traits sont bien des adaptations.

Mais ce n'est pas le cas de tous. L'apparition d'un caractère dépend de nombreux facteurs, tels que le hasard, les mécanismes de l'hérédité et l'histoire évolutive de l'organisme : un trait se forme toujours à partir d'un état préexistant, et s'il était « conçu » à partir de zéro pour être le plus efficace possible dans une situation donnée, il serait bien différent. Les tétons des mammifères mâles illustrent ces contraintes non adaptatives qui pèsent sur l'évolution.

Pourquoi mâles et femelles n'ont-ils pas emprunté un chemin évolutif différent, où seules ces dernières auraient été pourvues de mamelons ? Le dimorphisme sexuel est répandu dans la nature. Les paons mâles, par

exemple, sont parés d'un plumage spectaculaire, là où leurs compagnes affichent une parure plus terne. Chez les invertébrés, ces dames sont parfois des géantes : certaines araignées femelles du genre *Misumena* sont ainsi 100 fois plus lourdes que les mâles.

Une telle évolution divergente est assez contre-intuitive. Les petits reçoivent tous une copie de chaque gène de leur père et de leur mère : ils devraient donc hériter d'une combinaison de leurs traits et plus ou moins se ressembler.

Un découplage génétique

Des traits comme la taille ou la couleur des plumes n'ont pu évoluer séparément que parce que leur codage génétique est « découplé » entre les deux sexes, ce qui se produit dans trois types de cas : lorsque le gène codant le caractère n'est pas le même chez le mâle et chez la femelle, lorsqu'il est situé sur un chromosome sexuel (s'il se trouve sur un chromosome Y humain, par exemple, il ne sera pas transmis à une fille), ou lorsqu'il s'exprime différemment selon qu'il est intégré dans un génome masculin ou féminin.

Un tel découplage n'est pas la règle. Nombre de caractères ont la même base génétique chez les hommes et chez les femmes et s'ils s'avèrent utiles à l'un des deux, ils sont transmis aux descendants, indépendamment de leur sexe. Un découplage est le fruit d'une sélection. Il ne se produit que si le trait est important pour le succès reproductif de l'espèce, mais

orsque sa configuration « optimale » diffère pour le mâle et la femelle. Si cette configuration est identique pour les deux sexes, ou qu'une configuration est idéale pour l'un et sans importance pour l'autre, le codage génétique n'a aucune raison de se découpler.

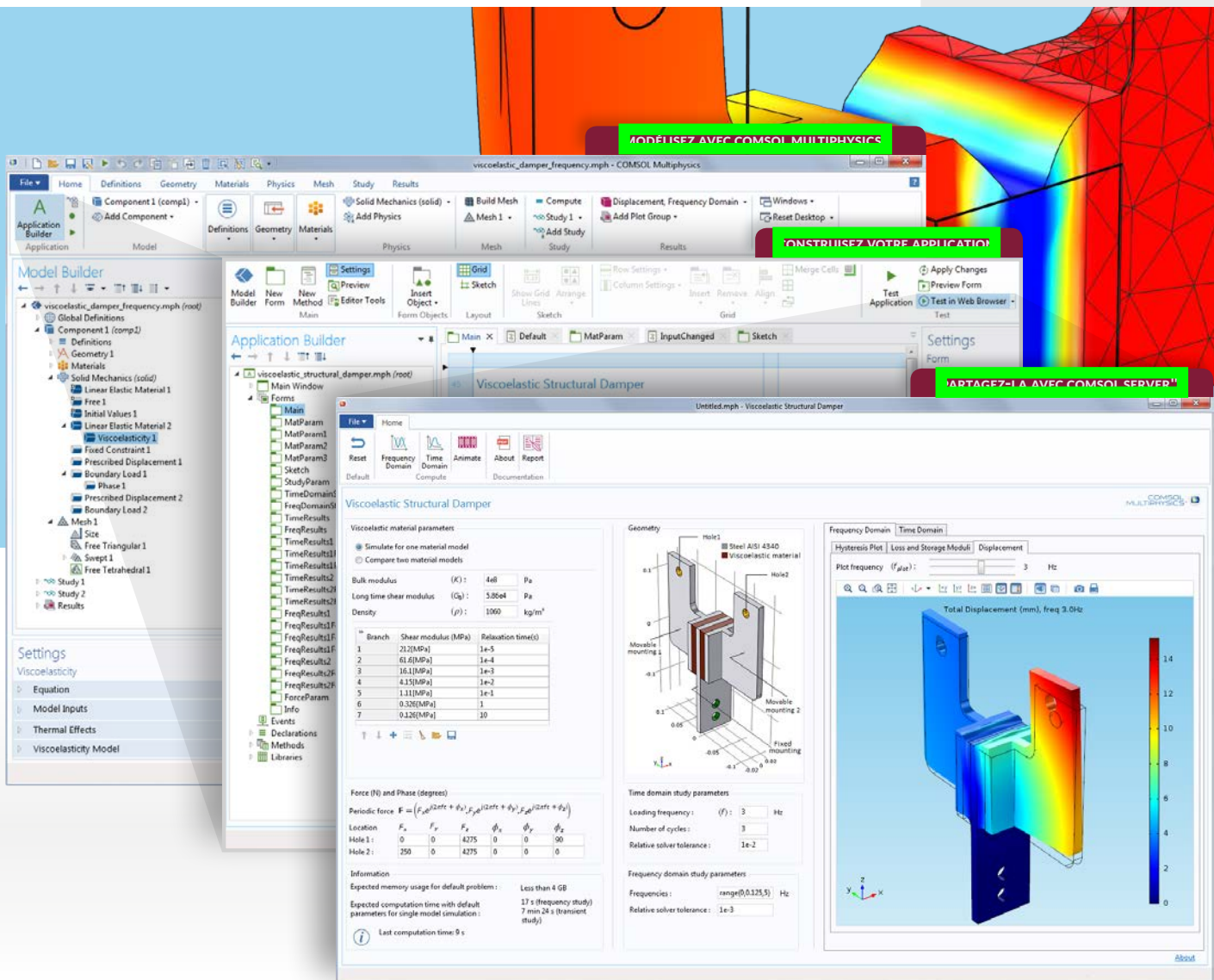
Et il ne l'a pas fait pour les tétons. Comme ils favorisent le succès reproductif de la femme et ne nuisent pas à celui de l'homme, ils ont été transmis indifféremment aux deux sexes. En somme, leur persistance s'explique moins par leur qualification que par leur absence de disqualification – puisqu'ils ne procuraient aucun désavantage aux mâles, la sélection naturelle ne les a pas supprimés.

Aucun désavantage ? Pas si sûr : les hommes aussi sont victimes de cancers du sein, bien que plus rarement que les femmes, et on pourrait le considérer comme une pression de sélection. Cependant, cette pression reste probablement faible et récente à l'échelle évolutive : si les tétons étaient si nocifs, ils auraient déjà disparu.

Dans un article célèbre, le paléontologue Stephen Jay Gould et le généticien Richard Lewontin ont souligné que nous ne devrions pas toujours chercher une explication adaptative pour chaque trait. Ainsi, les tétons des mammifères mâles ne sont qu'un sous-produit génétique de ceux des femelles.

Alors, pourquoi les hommes ont-ils des tétons ? Parce que les femmes en ont. ■

Andrew SIMONS est professeur de biologie à l'université Carleton, à Ottawa, au Canada.



Du Modèle à l'Application, vers le Serveur

PARTAGEZ VOTRE EXPERTISE EN SIMULATION

COMSOL Multiphysics® et son Application Builder fournissent des outils pour concevoir facilement des interfaces personnalisées pour vos applications en multiphysique. Utilisez ensuite COMSOL Server™ pour partager vos applications avec vos collègues et vos clients dans le monde entier.

Pour en savoir plus sur vos applications en simulation, rendez-vous sur **comsol.fr**

SCIENCE & GASTRONOMIE

Faut-il piquer les viandes ?

Des expériences montrent que, lors de la cuisson, le jus ne sort pas plus des viandes piquées que des viandes non piquées. Mais l'aspect de ces dernières est plus flatteur.

Hervé THIS



Jean Anthelme Brillat-Savarin, conseiller à la Cour de cassation au début du XIX^e siècle, faisait de si bonne littérature que les gourmands ont cru à ses histoires, pas toujours plausibles. Ainsi, il raconte qu'arrivé dans une auberge où il n'y avait plus de viande, mais voyant un gigot en train de rôtir pour des Anglais, il l'aurait percé d'une dizaine de coups de couteau, de sorte qu'il aurait recueilli le jus pour agrémenter les œufs brouillés : « Nous avalions la substance du gigot, en ne laissant à nos amis les Anglais que la peine de mâcher le résidu. »

Cette action néfaste du piquage des viandes est reprise dans de nombreux livres de cuisine classique. Par exemple, on retrouve souvent cette même prescription : « Ne pas piquer la viande pour la retourner, mais utiliser deux cuillers de bois, de manière à ne pas crever la couche superficielle de petits trous par lesquels le sang s'échapperait, ce qui rendrait le rôti sec et dur. »

Cependant, si une couche superficielle existe, avec une température qui passe de quelque 200 °C de la surface en contact avec la poêle aux 100 °C que ne peut pas dépasser un matériau contenant de l'eau (la viande est faite d'environ 70 % d'eau), cette couche est mince et n'est pas imperméable. On le voit quand on a cuit la première face d'un steak et que l'on a retourné ce dernier : on détecte à cuisson à point lorsque des gouttes de liquide sortent par la face supérieure.

Que penser, alors, de la prescription classique ? C'est ce que nous avons cherché à savoir, lors d'un de nos séminaires de gastronomie moléculaire. Les viandes

utilisées étaient du bœuf (tende de tranche) et du porc (échine). Les morceaux ont été divisés en parties égales, dont une était piquée d'une vingtaine de coups de couteau avant la cuisson, et l'autre pas, ou bien après le premier retournement, l'autre non. Pour voir des effets, nous avons transpercé les morceaux environ deux fois plus que ne l'avait indiqué Brillat-Savarin et nos morceaux étaient considérablement plus petits qu'un gigot. Pour mesurer l'effet de ce piquage, nous avons pesé les pièces aux différentes étapes de l'étude.

Le résultat est sans appel : les morceaux piqués ne perdaient pas plus de jus que les autres ! En revanche, le jus qui sortait était mieux visible, parce qu'il empruntait les trous faits dans la viande par le couteau.

Interprétons le phénomène. Placée dans de l'eau que l'on chauffe, la viande perd jusqu'à un quart de sa masse initiale, et quand l'eau refroidit, la masse de la viande augmente : la viande est comme une éponge qui serait pressée par la température.

Lors d'une cuisson classique, sur de la viande non piquée, du jus sort de partout, mais on observe souvent que la viande se bombe. Pourquoi ? L'afflux de jus, sous la viande, réduit la température, alors que le jus expulsé à la périphérie peut s'évaporer plus vite, ce qui conduit à un échauffement supérieur de la périphérie, donc à une contraction supérieure. Ce mécanisme explique pourquoi les morceaux d'échine de porc que nous avons testés formaient comme une sorte de vase, après le retournement qui suivait la cuisson de la première face, vase où le jus s'accumulait.

La quantité de jus perdue ? Environ 10 % de la masse pour la viande de bœuf que nous avons testée, cuite à point, et près de 30 % pour de l'échine de porc, cuite évidemment de façon plus soutenue (on doit détruire les parasites éventuels). C'est bien loin de vider la viande « jusqu'à la dernière goutte » !

Brillat-Savarin est donc pris en défaut d'affabulation, et l'on sait qu'il s'est souvent fait l'écho de théories culinaires fausses, qu'il a renforcées, au point qu'il a été repris quasi littéralement par de nombreux livres de cuisine.

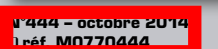
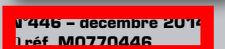
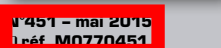
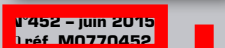
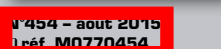
Pour autant, pouvons-nous piquer les viandes ? Pour ce qui concerne le jus, cela importe peu, mais il faut quand même signaler que des viandes piquées ont un moins bel aspect que des viandes non piquées. Or l'aspect est essentiel, pour l'art culinaire, au point que les professionnels savent bien qu'il faut d'abord cuire la plus belle des deux faces d'un morceau de viande, quand on le fait sauter. Et c'est cette face que les cuisiniers présentent, à raison, dans l'assiette.



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



**Complétez votre collection
dès maintenant!**

A découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Orge • 41350 Vineuil • e-mail : pourlasciencevpnc@daudin.fr

Je reporte ci-dessous les références à 8 chiffres correspondant aux numéros commandés et au format : XXXXXXXX XXXXXX :

Je reporte ci-dessous les références à 8 chiffres correspondant aux numéros commandés et au format : XXXXXXXX XXXXXX :

1er rel.				5,50 €		5,50 €
2e rel.				5,50 €		5,50 €
3e rel.				5,50 €		5,50 €
4e rel.				5,50 €		5,50 €
5e rel.				5,50 €		5,50 €
6e rel.				5,50 €		5,50 €
7e rel.				5,50 €		5,50 €
Trais port 14,90 € France – 12 € étranger			+			

Je commande la reliure *Pour la Science*
capacité 12 n^{os})
au prix de **14 €**

TOTAL A REGLER

Age Group	Male (%)	Female (%)
18-24	~10	~10
25-34	~10	~10
35-44	~10	~10
45-54	~10	~10
55-64	~10	~10
65-74	~10	~10
75-84	~10	~10
85+	~10	~10

à remplir en majuscules

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

☐ par carte bancaire

Date d'expiration

Code de sécurité

Télécharger les données relatives à la carte

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. **Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre.** ☐

TOUTES LES ARCHIVES
DEPUIS 1996 SUR
www.pourlascience.fr

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Le jour où mon robot m'aimera

Serge Tisseron

Albin Michel, 2015
[220 pages, 16 euros]

Voici – ce n'est pas fréquent – un livre d'anticipation étranger à toute emphase. L'auteur, familier de la technologie sans être béat devant elle, est éloigné et du catastrophisme et de l'enthousiasme imprudent qu'elle suscite souvent. Tout en exposant ce qu'on peut attendre de bon de l'expansion des robots, il ne cache pas qu'ils risquent d'apporter aussi du moins bon.

Les robots donnent une configuration neuve à une histoire ancienne, dont l'auteur dégage trois aspects. Depuis toujours, les hommes interfèrent entre eux, construisent des machines auxquelles ils commandent, font des images auxquelles ils s'attachent et attribuent plus ou moins de pouvoir. La nouveauté est que les robots vont satisfaire simultanément les attentes des hommes vis-à-vis de leurs semblables, des machines et des images.

« Nous interagissons avec les robots comme avec des humains, c'est-à-dire par la voix et par le regard ; ils resteront en même temps toujours sous contrôle, imités par les programmes que nous y aurons introduits comme de simples machines ; et il sera possible de leur donner l'apparence de notre choix au point d'en faire des super images animées à notre service ! »

Que nous nous attachions aux robots n'inquiète pas l'auteur : s'attacher à des images ou à des machines est une constante humaine. Mais si nous nous attachons à nos robots comme à des humains, au point de les prendre pour des humains, nous

risquons, en retour, d'attendre des humains qu'ils se comportent comme des robots, c'est-à-dire qu'ils simulent leurs sentiments et fassent nos quatre volontés. Voilà qui n'arrangerait pas les relations entre humains... Pour prévenir ce danger, l'auteur propose de familiariser très tôt les enfants avec la réalité technique des robots. Qu'ils en fabriquent eux-mêmes, et ils comprendront que les robots sont faits à l'image des humains, mais ne sont pas humains.

■ SERGE TISSERON ■

Le jour où mon robot m'aimera

Vers l'empathie artificielle



ALBIN MICHEL

Il ne faudra pas non plus se laisser prendre par l'éventuel aspect tourmenté donné aux robots. En tant qu'objets interconnectés, ceux-ci peuvent jouer le rôle de mouchards, signalant tous nos faits et gestes à quelque Big Brother. Mouchards, mais leur apparence avenante rendra redoutables : nous serons enclins à nous confier à eux sans retenue. Contre ce danger-là, il faudra exiger des programmeurs que tous leurs choix soient explicites. Cette suggestion de Serge Tisseron est sans doute plus facile à énoncer qu'à mettre en pratique...

Dans ce livre à l'écriture sans apprêt, l'auteur, tout en réfléchissant aux robots, s'interroge aussi sur l'homme.

Jidier Nordor

CRYPTOZOLOGIE

Les Ours insolites d'Afrique

Bernard Heuvelmans

L'Œil du Sphinx, 2015
[262 pages, 32 euros]

L'ours est présent dans de nombreuses parties du monde, mais ne fait pas partie de la faune africaine. On l'imagine mal au milieu des girafes. Pourtant, des rumeurs, des récits et des témoignages font état de la présence d'animaux semblables à des ours dans diverses parties de l'Afrique. Enrichi de notes de Jean-Luc Barloy et Benoît Grison, ce livre posthume du « père de la cryptozoologie », Bernard Heuvelmans (1916-2001), est consacré à ces énigmes.

L'auteur s'attaque d'abord au mystère de l'« ours nandi », être énigmatique signalé en Afrique orientale. Il nous transporte dans une Afrique révolue, celles des administrateurs coloniaux, des chasseurs de fauves et des indigènes aux traditions inquiétantes. C'est en effet au début du XX^e siècle que des colons anglais rapportent avoir aperçu des bêtes insolites, ressemblant à des ours, en particulier dans le pays des Nandi, au Kenya – d'où le nom donné à l'animal. Les Africains ont, eux, des noms divers pour désigner une créature très sanguinaire qui fait régner la terreur. Mais ni les témoignages visuels ni les croyances locales ne fournissent un portrait cohérent de cet être, qui, selon les cas, tient de l'ours, de l'hyène ou du singe... On laissera le lecteur découvrir les interprétations de l'auteur et juger de leur vraisemblance. Aujourd'hui, on ne parle plus guère de l'ours nandi ; les populations locales, confrontées à la guerre, au génocide et au terrorisme, ont sans doute d'autres chats à fouetter.



La deuxième énigme décortiquée par Bernard Heuvelmans est celle des ours d'Afrique du Nord. Il existe des preuves paléontologiques indéniables de la présence d'ours, proches de l'ours brun d'Europe, au Maghreb durant le Quaternaire. Mais ont-ils pu y survivre jusqu'au début de notre ère, comme l'ont affirmé divers auteurs antiques, voire jusqu'à une date beaucoup plus récente, comme le suggèrent certains témoignages du XIX^e siècle ? Face à certains zoologues incrédules, Bernard Heuvelmans plaide pour l'existence récente de l'ours en Afrique du Nord. Son approche, fondée sur une énorme culture zoologique et un savant mélange d'esprit critique et d'imagination, nous donne un livre captivant.

Eric Buffetaut

CNRS et Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, Paris

ASTRONOMIE

Art & Astronomie – Impressions célestes

Yaël Nazé

Omniscience, 2015
[240 pages, 35 euros]

Vaste intersection que celle de l'art et de l'astronomie ! L'auteure nous invite à

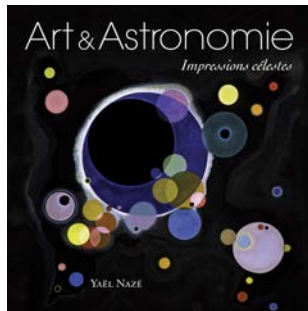
explorer ce domaine partagé en abordant sous plusieurs angles bien choisis. Le premier, la voûte céleste en général et les événements célestes remarquables, a été une source d'inspiration pour des artistes de toutes époques et de tous continents. Bien entendu, comme tous les autres chercheurs, les astronomes ont très longtemps employé cet outil essentiel qu'était le dessin comme moyen de représentation des astres ; cela durera jusqu'à l'avènement de la photographie.

Un autre angle adopté par l'auteure est celui des œuvres d'art offrant un jeu de décryptage du ciel à l'aide des logiciels modernes. Enfin, Yaël Nazé traite les représentations artistiques des astronomes eux-mêmes, ces savants longtemps entourés d'une aura certaine...

C'est un livre qu'on pourrait sans doute se contenter de feuilleter, tant il est riche d'illustrations, des plus célèbres telle la *Nuit étoilée* de Van Gogh aux plus surprenantes tels les *Superiorae* de Vasarely, des dessins les plus rudimentaires (Orion du XVI^e siècle) aux plus soignés (on découvrira par exemple avec intérêt la contribution d'Étienne Léopold Trouvelot).

Mais le découpage en nombreuses facettes donne envie de faire des allers et retours ou de se plonger dans les textes pour aller jusqu'au bout dans l'exploration de chacune : on y redécouvre ou apprend alors une foule d'anecdotes, de données historiques tant sur les sciences que sur l'art, qui interrogent sur les interactions de leurs évolutions respectives.

Car de la même manière que l'artiste se nourrit de l'astronomie, l'astronome fait appel à l'art pour mettre en scène ses découvertes : notre vision du cosmos est aujourd'hui encore



est bien plus influencée par l'œil de l'artiste que nous ne l'imaginons généralement.

A titre personnel, je suis particulièrement ravi d'avoir enfin entre mes mains un ouvrage traitant de mon domaine qui parlera aussi à ma fille allergique aux sciences !

Christophe Pichon

Institut d'astrophysique de Paris

PREHISTOIRE

Lascaux, Chauvet-Pont-d'Arc et autres grottes ornées

Stéphanie Redoulès et coll.

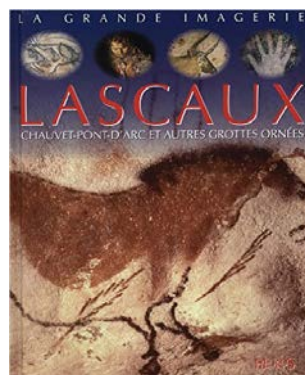
Fleurus, 2015
[28 pages, 6,95 euros].

Les livres éducatifs pour la jeunesse sont une mine d'émerveillement pour les adultes. Les informations ont beau

souvent être les mêmes, chaque ouvrage est différent. Ludique ou « vintage », humoristique ou sérieux, il y en a pour tous les goûts. Celui-ci reprend le thème éculé de la grotte de Lascaux : comment elle fut découverte, à quel point elle est exceptionnelle, ce qu'elle nous apprend sur les hommes préhistoriques, leur environnement, leurs techniques artistiques, etc. La nouveauté est le traitement graphique

et la façon dont les textes sont positionnés et hiérarchisés. Les images sont colorées et efficaces, la mise en pages explosée de manière à ne pas lasser le lecteur juvénile. On a l'impression d'être devant un site internet, où il est possible de picorer et de se promener sans suivre un fil directeur. C'est bien entendu l'effet recherché et c'est bien joué.

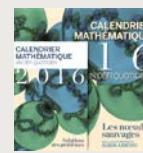
Le livre se poursuit avec Chauvet et son fac-similé, puis d'autres exemples de grottes ornées. Les peintures rupestres d'Indonésie ne sont pas oubliées, preuve que les auteurs s'abreuvent aux meilleures sources. Ils auraient cependant pu s'abstenir de parler de la « théorie des ombres chinoises ».



glucubration qui dura le temps d'un été et de quelques émissions télévisées, et qu'il n'était vraiment pas la peine de faire connaître à nos chères têtes blondes, suffisamment en contact avec les bêtises des adultes leurs journées durant ! Mention spéciale au chien Robot, véritable découvreur de Lascaux, qui a enfin droit à son portrait. Autres temps, autres mœurs !

Romain Pigeaud

Chercheur associé à l'université de Rennes 1



Calendrier mathématique 2016

L. Rechtman Bulajich (dir.), Presses univ. de Strasbourg
28 pages, 15 euros.

Le calendrier comporte un problème soluble par jour et un livret de solutions de 112 pages. Le concept, inventé en Colombie, vise à favoriser de façon ludique l'apprentissage de la résolution de problèmes mathématiques. Celui de 2016 est illustré par les images de synthèse du mathématicien mexicain Aubin Arroyo, qui accompagnent des textes portant sur les nœuds et leur théorie.



Climats Passé, présent et futur

M.-A. Mélières et Ch. Maréchal

Belin, 2015
(414 pages, 34 euros).

Parler de climat sérieusement implique l'entrer dans la complexité des interactions des systèmes atmosphériques, marins et terrestres. Ce livre soutenu d'illustrations utiles et belles donne à ce propos des repères scientifiques essentiels. Il est passé en revue les caractéristiques du climat de la planète, son bilan énergétique, les causes de l'évolution climatique à diverses échelles temporelles, et comment la reconstitution des climats passés aide à interpréter les évolutions récentes et actuelles et... prévisibles.



Le Monde de Darwin

Guillaume Lecoindre et Patrick Tort (dir.)

La Martinière, 2015
(192 pages, 29,90 euros).

Darwin est si important, mais si mystérieux au fond, que l'on n'en finit pas d'appréhender sa personnalité. Deux de nos meilleurs connaisseurs du savant font un tour d'horizon de son « monde » : ils précisent ses origines, ses influences, rappellent son invention majeure, dispersent les lieux communs et les fausses idées brouillant la perception de lui ou de son œuvre, analysent son influence, énorme sur l'art, dissimulée sur la pensée anthropologique, et pour finir décrivent ses affections intimes.

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



AUTORÉFÉRENCES

L'autoréférence, un écueil sur lequel seuls les logiciens risquent d'achopper ? Que non ! Elle peut prendre toutes les formes. Exemples :

- Poétique. L'injonction de Verlaine « Prends l'éloquence et tords-lui son cou » est d'une éloquence proche de l'emphase, donc mérite qu'on la prenne et lui torde le cou.
- Bureaucratique. Certaines lettres administratives s'achèvent par : « Vous souhaitant bonne réception de la présente ». Ce vœu n'atteint le destinataire que s'il s'est réalisé !
- Approximative. « Les experts disent souvent que les experts se trompent souvent » (Chawki Amari, *Le faiseur de trous*, éd. Barakha, Alger, 2007, p. 161). Parole d'expert...



– Irréfutable. « Presque toutes les règles ont des exceptions. » Cette règle-là est sans exception, ce qui la confirme : elle fait un usage adéquat du flou du mot *presque*.

– Philosophique. « L'excès de précision, dans le règne de la quantité, correspond très exactement à l'excès du pittoresque, dans le règne de la qualité. La précision numérique est souvent une émeute de chiffres, comme le pittoresque est, pour parler comme Baudelaire, « une émeute de détails » » (Gaston Bachelard, *La Formation de l'esprit scientifique*, Paris, 1970, p. 212). Quel excès de précision, ce « très exactement » de la première phrase !

– Typographique. Devinette : c'est quoi, une coquille sans q ? Réponse : une coquille.

– Musicale. Dans *Le Billet de loterie*, opéra de Nicolò Isouard, se trouve une aria, fort virtuose, dont le titre et le refrain sont : « Non, je ne veux pas chanter. »

– Roublarde. « En psychanalyse, le mensonge dit vrai. » Venant d'un psychanalyste.

ce propos est plus retors qu'un simple avatar du paradoxe du menteur.

– Sémantique. Le mot *compendieuse* vient, à l'origine, signifiait *en bref*, signifie désormais *longuement*, parce que les locuteurs appliquent ce long mot à lui-même.

– Ane de Buridan. Les mots *superflu* et *superfétatoire* sont synonymes. Donc, soit *superflu* est superfétatoire, soit *superfétatoire* est superflu. Mais comment trancher ?

L'EFFET BOLÉRO

Quand j'écoute le *Boléro* de Ravel, ses thèmes inlassablement répétés me deviennent si familiers, à force, que j'ai l'impression de les connaître. En même temps, je m'en lasse, excédé par leur sempiternel retour. Ainsi, le *Boléro* a un effet étrange : je ne sais pas si je l'aime. Cet effet Boléro se produit avec d'autres morceaux connus. Mon plaisir à les entendre se déroule comme je m'y attends m'empêche d'être sûr que je les goûte vraiment. Si ça n'avait tenu qu'à moi, auraient-ils atteint une telle gloire ?

L'effet Boléro existe aussi en peinture. Apercevant la *Joconde*, à travers une cohue de visiteurs, j'ai éprouvé la fierté d'avoir avec elle une familiarité authentique : elle ressemble à ses reproductions ! Mais je n'ai aucune idée de l'émotion que j'aurais ressentie devant ce tableau s'il n'avait pas été précédé de sa réputation.

Quelle part l'autosuggestion a-t-elle lorsqu'on est touché par des œuvres d'art ? Il en existe de tellement fameuses, qu'on n'ose plus se demander si on les aime. Et si d'aventure on le fait quand même, on est parasité par leur célébrité. Ce n'est pas à elles qu'on réagit, mais à l'aura dont elles



puissent. Du coup, la question de la valeur artistique de ces œuvres d'art perd sa pertinence. C'est un comble, de même que ce serait un comble, pour une loi scientifique, d'être célèbre au point que nul n'ait plus la hardiesse de questionner sa validité...

CAUSE ET EFFET SIMULTANÉS

Dans « Il a crié en tombant », le participe présent exprime une cause : c'est parce qu'il tombait qu'il s'est mis à crier.

« Il est tombé en criant » est à peu près synonyme de la phrase précédente, mais là, le participe présent *criant* exprime une conséquence.

Ainsi, le participe présent peut aussi bien exprimer une cause qu'une conséquence. Or



cette forme verbale sert à exprimer la simultanéité. Pour le langage usuel, deux événements dont l'un est cause, ou conséquence, de l'autre peuvent donc être simultanés !

L'adverbe *cependant* offre un paradoxe analogue. Par son étymologie, il exprime aussi la simultanéité de deux faits : il dérive du participe présent du verbe *pendre* (cf. « une affaire pendante »). Mais, dans l'usage actuel, il y ajoute souvent une nuance d'étonnement. « Il est tombé. Cependant, il n'a pas crié » : exprimant une simultanéité, *cependant* en est venu à exprimer une opposition. À en juger d'après cette évolution de sens, le langage courant estime que, quand deux événements sont simultanés, ils sont, en général, plus ou moins contradictoires l'un avec l'autre !

La science et la philosophie, qui, sur la simultanéité et la causalité, n'ont pas peur de développer des thèses faisant fi de l'intuition, sont, pour une fois, en bonne compagnie : elles ont la caution du sens commun. ■

À la CASDEN, le collectif est notre moteur !

Banque coopérative créée par des enseignants, la CASDEN repose sur un système alternatif et solidaire : la mise en commun de l'épargne de tous pour financer les projets de chacun.

Comme plus d'un million de Sociétaires, faites confiance à la CASDEN



Decouvrez la CASDEN
sur www.casden.fr ou contactez
un conseiller au 01 64 80 64 80*

Accueil téléphonique ouvert du lundi au vendredi
de 8h30 à 18h30 (heure de Paris)
Appel non surtaxé. Coût selon votre opérateur.



l'offre CASDEN est disponible
dans les Délégations Départementales CASDEN
et les agences Banques Populaires.

casden
BANQUE POPULAIRE

CASDEN, la Banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture

FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.



AU SEIN D'UN PARTENARIAT AVEC L'ÉTUDIANT, SON LABORATOIRE D'ACCUEIL
ET UN COFINANCEUR PUBLIC OU PRIVÉ,
L'ADEME FINANCE VOTRE THÈSE PENDANT 3 ANS POUR INVENTER LE MONDE DE DEMAIN.

www.ademe.fr/theses