Les plantes, elles aussi, perçoivent leur environnement !

POUR LA
SCIENCE

Avril 2014 - n° 438

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Les couleurs des exoplanètes

Les coïncidences au loto : prévisibles !

Oxygéner les tumeurs pour mieux les détruire

La préhistoire du fromage

M 02687 - 438 - F: 6,20 € - RD

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

Raven | Johnson | Mason | Losos | Singer

Biologie

UNE RÉFÉRENCE INTERNATIONALE

Un ouvrage indispensable pour les étudiants qui veulent réussir et pour tous les passionnés de biologie.

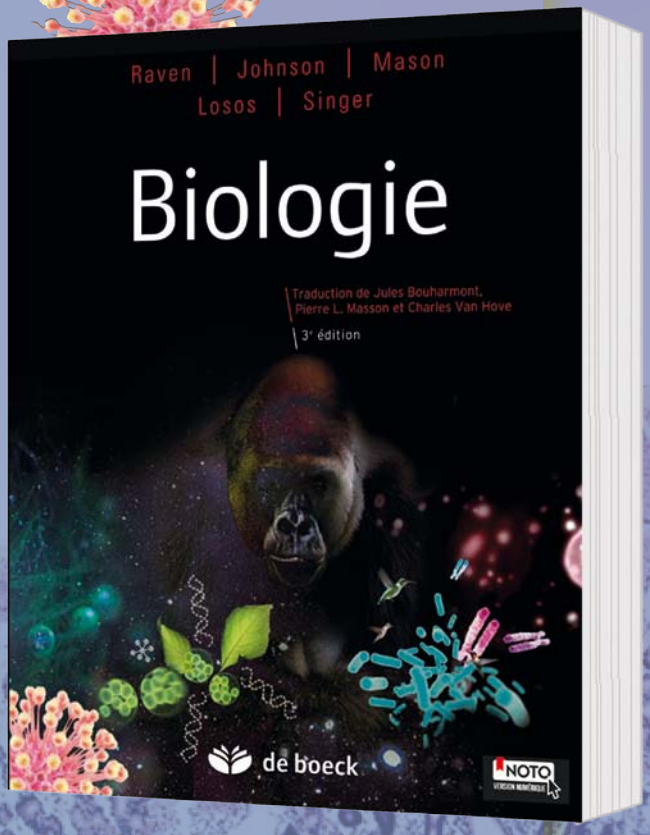
Cette 3e édition française, profondément remaniée et actualisée, propose une approche progressive et complète de cette discipline en constante évolution.

Les qualités didactiques et iconographiques qui ont fait le succès de la précédente édition ont été encore améliorées.

- Approche fondée sur l'observation et l'expérimentation
- Glossaire de plus de 1000 termes
- Plus de 2000 photos et illustrations en couleur
- Liste d'objectifs en début de chapitre et résumé en fin de chapitre
- Site compagnon en français : www.ravenbiologie.com : + de 500 QCM
- En anglais : www.ravenbiology.com : vidéos, quiz, expériences, etc.

NOTO VERSION NUMÉRIQUE

- Accès à la version numérique www.noto.deboeck.com/
- Ouvrage accessible online ou offline, sur PC ou tablette
- Personnalisez votre manuel, surlignez, annotez, partagez vos annotations
- Enrichissez-le en ajoutant photos, hyperliens, etc



3e édition 2014
1400 pages
75 € broché
89 € version luxe cartonnée

En librairie ou sur www.deboeck.fr

de boeck

POUR LA SCIENCE
www.pourlascience.fr
8, rue Férou - 75278 Paris cedex 06
Standard : 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice de la rédaction : Françoise Pétry
Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
L'Essentiel Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef adjointe : Bénédicte Salthun-Lassalle
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove
Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This
Ont également participé à ce numéro :
Jean Bérard, Geneviève Brandeis, Franck Daninos, Isabelle Gallagher, Jean-Marc Guehl, Stéphane Huvé, Anne Jambois, Christophe Lacave, Julien Lesgourgues, Anouck Ody, Philippe Poulin, Cécile Vigneau, Loïc Villain

PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29
SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04
Espace abonnements :
http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience
Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06
Commande de livres ou de magazines :
Pour la Science 628 Avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil
DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.
SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina.
Editors : Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. Executive Vice President : Michael Florek.
Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.
© **Pour la Science S.A.R.L.** Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).
OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2012

Couleurs et perception

La Terre, planète bleue. Mars, planète rouge. On est habitué à associer des couleurs à certaines planètes du Système solaire. Le reste de l'Univers, plongé dans l'obscurité, semble sans couleurs. Pourtant, les astrophysiciens ont récemment repéré des exoplanètes colorées (en bleu profond, gris, mauve et même noir). Ces couleurs renseignent sur la composition de l'atmosphère de ces objets lointains. Vapeur de sodium, brouillard de particules, qui diffusent ou absorbent certaines longueurs d'onde : les mécanismes qui donnent naissance aux couleurs sont variés *(voir Les couleurs des exoplanètes, page 20)*.

D'après le dictionnaire, la couleur est la « sensation résultant de l'impression produite sur l'œil par une lumière émise par une source et reçue directement ou après avoir interagi avec un corps non lumineux. » Définition qui pose une question : quelle est cette « impression » ? Ce serait une perception élaborée par le cerveau, au-delà de la sensation immédiate. La perception permet à un organisme d'interpréter grâce à son système nerveux les sensations reçues du monde extérieur.

Les mécanismes qui donnent naissance aux couleurs sont variés.

Dès lors, la perception implique un système nerveux, ce dont sont dotées les guêpes. Effectivement, leur cerveau est assez élaboré pour qu'elles perçoivent leurs congénères, et même qu'elles les reconnaissent individuellement *(voir La reconnaissance visuelle chez les insectes, page 28)*. En revanche, que dire des plantes ? Les biologistes montrent qu'elles réagissent à leur environnement : la lumière, la gravité, le contact par exemple. Les réactions chimiques sous-jacentes mettent en œuvre des molécules similaires à celles présentes dans le règne animal. *Stricto sensu*, les plantes ne « perçoivent » pas leur environnement. Mais faute d'un terme adapté, les biologistes emploient le mot. Ces propriétés des végétaux soulèvent la question des frontières entre le monde animal et le monde végétal *(voir Percevoir et bouger : les plantes aussi !, page 40)*.

La perception implique conscience et intelligence, grâce auxquelles le poète Paul Éluard peut écrire dans *L'amour la poésie* (1929) : « La Terre est bleue comme une orange[...]
Les guêpes fleurissent vert [....]. »

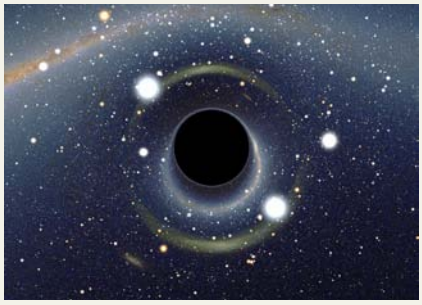
SOMMAIRE

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

Actualités

6 **L'horizon des trous noirs remis en question**



9 ***Homo erectus*, deux fois sorti d'Afrique**

10 **Cancer du sein avancé : vers une médecine personnalisée**

11 **Des neutrinos massifs, clé d'une énigme cosmologique**

12 **Équations de Navier-Stokes : une preuve difficile**

... et bien d'autres sujets.

Opinions

16 POINT DE VUE
Agir pour rendre l'université plus attractive
Bertrand Monthubert

19 VRAI OU FAUX
Peut-on avoir une acuité visuelle supérieure à 10/10 ?
Laurent et Julia Laloum

65 CAHIER SPÉCIAL
Adaptation au changement climatique
En partenariat avec INRA SCIENCE & IMPACT

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement brochés sur la totalité du tirage ; un encart « Voyage culturel en Turquie » est posé sur la totalité de la diffusion.
En couverture : © Sdecoret/shutterstock.com

À LA UNE

20
ASTROPHYSIQUE
Les couleurs des exoplanètes
F. Pont et Th. Evans
La Terre est bleue, Mars est rouge... Et les planètes extrasolaires ? Isis est la première d'entre elles à avoir révélé sa couleur, livrant ainsi de précieux indices sur la composition de son atmosphère.

28 ÉTHOLOGIE
La reconnaissance visuelle chez les insectes
Elizabeth Tibbetts et Adrian Dyer
Reconnaître les traits faciaux de ses congénères ne requiert pas un cerveau complexe. Certains insectes sont étonnamment doués pour cette tâche.

36 MATHÉMATIQUES
Des coïncidences pas si étranges
David Hand
Quand deux tirages successifs du loto donnent les mêmes numéros gagnants, faut-il être surpris ? En fait, de telles coïncidences, qui nous paraissent très improbables, se produisent souvent – et cela en conformité avec la théorie des probabilités.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

40 BIOLOGIE VÉGÉTALE

Percevoir et bouger : les plantes aussi !

Catherine Lenne, Olivier Bodeau et Bruno Moulia

Les plantes perçoivent leur environnement et s'y adaptent par diverses formes de mouvements. Des capacités qu'on a longtemps cru réservées aux animaux et que l'on commence à décrypter.

© Marco Uliana-shutterstock.com

48 ARCHÉOLOGIE

Les débuts européens de la production laitière

Mélanie Roffet-Salque et Richard Evershed

L'analyse biochimique de tessons de poterie a révélé comment la production laitière s'est mise en place dans l'Europe néolithique et a apporté la preuve que l'on fabriquait du fromage il y a au moins 7500 ans.

56 MÉDECINE

Cancer : desserrer les tumeurs pour mieux les traiter

Rakesh Jain

Dans une tumeur, les vaisseaux sanguins et lymphatiques sont souvent comprimés, ce qui empêche les médicaments anticancéreux d'atteindre leurs cibles. Des cancérologues espèrent améliorer l'efficacité des traitements en réduisant cette compression.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

Regards

94 HISTOIRE DES SCIENCES

Le monde givré de Bernardin de Saint-Pierre

Frédérique Rémy

En 1784, l'écrivain Bernardin de Saint-Pierre imagina d'énormes masses de glaces polaires dont les cycles de fonte auraient régi la Terre.

86 LOGIQUE & CALCUL

Les preuves de travail

Jean-Paul Delahaye

Donner à des ordinateurs des problèmes à résoudre permet de les freiner. C'est utile pour lutter contre les spams par exemple.

100 SCIENCE & FICTION

Le retour des Titans

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

102 ART & SCIENCE

La jupe des derviches : et pourtant, elle tourne...

Loïc Mangin

104 IDÉES DE PHYSIQUE

La recette d'une belle mousse de bière

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

109 SCIENCE & GASTRONOMIE

Des insectes à cuisiner

Hervé This

110 À LIRE

POUR LA SCIENCE

Maintenant sur tablette et sur smartphone !

Téléchargez gratuitement l'application « Pour la Science »

Le 1er numéro est offert !

- lecture intuitive
- sommaire interactif
- contenus enrichis
- feuilletage hors-connexion

Disponible sur App Store

DISPONIBLE SUR Google play

de **Didier Nordon**

➜ LE POIDS DE LA POUSSIÈRE

Évaluer le poids de la poussière qui, chaque jour, se dépose sur les meubles et sur les sols des appartements, maisons, foyers, locaux, etc., existant en France.

Évaluer le poids de la poussière ôtée chaque jour, en France, par les balais et les aspirateurs qui s'y agitent.

En déduire que le poids du bâti en France est une fonction croissante du temps.

Quelle est la probabilité qu'un grain de poussière, après avoir été balayé ou aspiré, s'évade de la poubelle et revienne en circulation ? Quelle est la probabilité qu'un grain de poussière ôté d'un meuble dans une maison bordelaise ait déjà été ôté antérieurement du sol d'un appartement parisien ?

Peut-on imaginer un procédé de valorisation qui transforme la poussière en une matière utile et non génératrice de poussière ? Si oui, peut-on espérer que la poussière, un jour, disparaisse et qu'il n'y ait plus jamais besoin de faire le ménage ?

À ceux qui trouveraient frivole cette chronique, rappelons une observation d'Alexandre Vialatte : « L'homme n'est que poussière, c'est dire l'importance du plumeau. »

➜ L'AVENIR... AURA BIEN LIEU

Les experts ont beau se réunir en comités de 10, 20 ou 30 afin d'explorer les scénarios possibles pour l'avenir, celui-ci déjoue les supputations. Sur le terrain, les interactions de millions d'acteurs créent des chemins inattendus, qu'aucun comité ne peut anticiper : l'imagination humaine excède l'imagination humaine !

Cependant, le *crowdsourcing* – en bon français le « collaborat » – permet désormais de faire coopérer une foule entière. Laquelle peut être aussi créative, voire davantage, que l'ensemble des acteurs appelés à façonner l'avenir. Il suffit pour cela qu'elle coïncide avec ledit ensemble. Les prévisions faites par cette foule ne risquent alors pas d'être démenties, étant donné que les interactions en son sein se déroulent « en temps réel » : puisqu'elles sont aussi nombreuses, elles durent un temps égal à celui de la réalisation effective du scénario.

On retrouve, transposé au domaine temporel, le paradoxe de la carte à l'échelle 1. C'est la plus précise, mais c'est la moins utile.

Grâce à cette expérience de pensée, la technologie moderne confirme un constat empirique. La seule façon sûre de connaître l'avenir, c'est d'attendre qu'il se réalise.

➜ GREFFES D'IDÉES

« Nous sommes portés à considérer toute pensée étrangère comme une forme d'agression à l'encontre de nos propres convictions. [...] Penser, c'est plus souvent refuser qu'accepter. Je pense, donc je récuse ce qui est étranger à mes accommodements intérieurs, c'est-à-dire à ma personnalité. [...] L'esprit a une capacité quasi miraculeuse à organiser ses propres défenses contre l'ennemi extérieur, contre le fait ou l'idée inopportune qui risque de déstabiliser son système interne en y introduisant le doute et le trouble » (Georges Picard, *Penser comme on veut*, Corti, 2014).

Lors d'une greffe d'organe, la médecine a appris à inhiber le rejet du non-soi par le soi. Si la greffe d'idée pouvait faire un progrès semblable, la pensée connaîtrait un foisonnement prodigieux. Un cerveau hébergeant une idée qui lui est radicalement étrangère, s'en nourrissant et la nourrissant, porterait en effet des fruits admirables de nouveauté. Greffons la foi à un athée, et il dotera Dieu d'atours qu'aucun croyant n'a jamais conçus.

Greffons la franchise à Tartuffe, et il célébrera la chair en des hymnes dont la hardiesse magnifique supplantera celle du poète le plus voluptueux.

La greffe d'organe permet au corps de survivre, la greffe d'idée permettra à l'esprit de se surpasser.

➜ LES VERTUS DE LA BÊTISE

La bêtise est la chose au monde la mieux partagée. La preuve, c'est que les gens qui se piquent d'être intelligents s'en croient souvent exempts – ce qui est une forme criante de bêtise !

« Qu'entendez-vous par bêtise ? », demandera-t-on. Tenter de répondre serait tomber dans un piège. La définir incite à se placer en extériorité par rapport à elle, au risque d'être victime d'un effet paille et poutre : l'auteur ajuste sa définition de façon qu'elle s'applique admirablement aux autres, pas à lui. Il sombre alors dans la bêtise de croire lui échapper.

La bêtise d'autrui est agaçante, révoltante. Mais exécrer la bêtise en général, dans l'abstrait, est vain. Cette vitupération mène soit à s'exécrer soi-même, soit à se figurer qu'on échappe au lot commun et à se poser en victime de la bêtise des autres, alors qu'on est coupable aussi.

Quoique le mot bêtise évoque les animaux, la bêtise est une spécialité humaine avant tout. Dire que les bêtes sont bêtes est un pléonasme que même le bon sens vulgaire refuse. Depuis quelques années, cependant, les chercheurs trouvent de plus en plus d'intelligence chez les animaux. Ne doutons pas, alors, qu'ils vont trouver chez

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

eux cette compagne inexorable de l'intelligence qu'est la bêtise. La phrase « Il y a de la bêtise chez les bêtes » deviendra une vérité savante !

Ainsi, la bêtise suscite des paradoxes propres à réjouir l'esprit. Ne serait-il pas dommage qu'elle disparaisse de cette terre ?

➜ SUBLIME EMPHASE

Ah, l'emphase du poète tressant des lauriers au savant ! Personne, je crois, n'a surpassé le poète anglais Alexander Pope (1688-1744) :

La nature et ses lois se cachaient dans la nuit ;
Dieu dit « Que Newton Soit ! » et tout devint lumière.

(Nature and Nature's laws lay hid in night:
God said, "Let Newton be !" and all was light.)

Pourtant, les Français ont fait ce qu'ils ont pu. En 1914, l'Académie française mit au concours un éloge de Pasteur. Charles Richet (1850-1935), lauréat du prix Nobel de médecine 1913, remporta le premier prix grâce à une pièce en alexandrins, publiée en 1916, dont voici quelques passages.

Comme un fauve assoupli sous la main du dompteur,
Le microbe féroce obéit à Pasteur ! [...]
Parfois sur les troupeaux un mal terrible frappe ! [...]
Ce mal c'est le charbon, et la cause, un bacille !
Un petit bâtonnet robuste, infime, habile,
Effrayant de vigueur et de fécondité ! [...]
Eh bien ! Ce monstre affreux, Pasteur le rend docile. [...]

L'antique médecine en peut pâlir d'horreur ;
Son long passé n'est rien. Tout commence à Pasteur !

Ceux que ces vers auront charmés en trouveront d'autres dans le recueil de Hugues Marchal *Muses et ptérodactyles* (Seuil, 2013), qui rassemble des poèmes inspirés par la science. ■

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

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

& Découvrez aussi l'application « Cerveau & Psycho ».

Disponible sur App Store · Disponible sur Google play

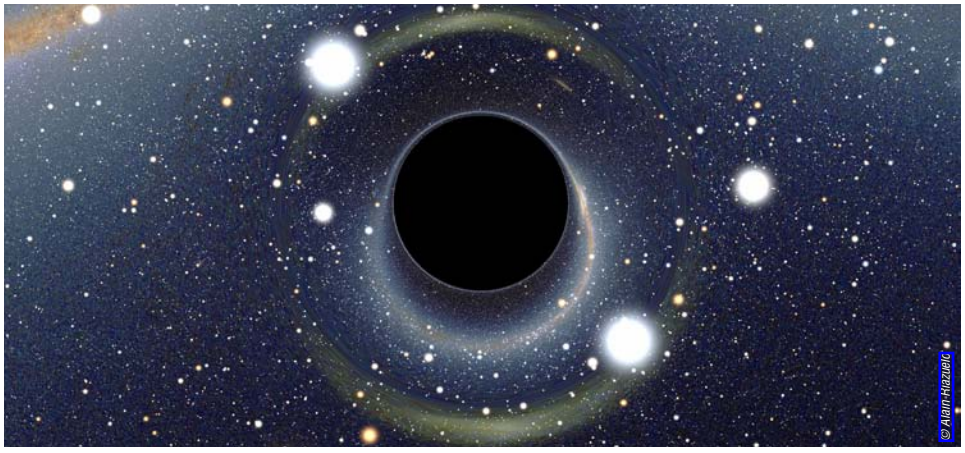
Flashez ce QR code avec votre mobile ou votre tablette pour télécharger immédiatement l'application.

Téléchargez gratuitement l'application sur App Store et Google Play.
Le 1er numéro de *Pour la Science* est offert !

Astrophysique

L'horizon des trous noirs remis en question

Que devient l'information dans un trou noir ? Stephen Hawking apporte une nouvelle contribution à un vieux débat, en proposant de revoir la notion clef d'horizon des événements.



Cette simulation illustre les effets de courbure de l'espace-temps au voisinage d'un trou noir. Mais que se passe-t-il à l'horizon des événements ?

Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, au Royaume-Uni, a créé l'émoi chez les spécialistes. Dans un article rendu public il y a quelques semaines, il propose de revoir radicalement la description des trous noirs, en abandonnant une de leurs caractéristiques principales, l'horizon des événements – du moins tel qu'on le définissait jusqu'à présent.

Cette proposition fait suite à un problème soulevé en 2012 par Joe Polchinski et ses collègues, de l'Institut Kavli de physique théorique, en Californie. L'objectif de ces physiciens était de rassembler les développements les plus récents en relativité générale, mécanique quantique et thermodynamique sur ce qui se passe à proximité d'un trou noir.

Ces astres compacts déforment autour d'eux l'espace-temps à un point tel que, en deçà d'une limite nommée l'horizon des événements, rien ne peut échapper à leur attraction gravitationnelle, pas même la lumière. Dans le cadre de la relativité générale, cependant, un observateur en chute libre ne perçoit rien de particulier quand il traverse l'horizon des événements. Mais J. Polchinski et son équipe ont dû attribuer des propriétés particulières à cette région pour garantir la conservation de l'information.

De quoi s'agit-il ? En 1974, S. Hawking avait montré qu'un trou noir rayonne : il perd une partie de sa masse par « évaporation ». Ce phénomène repose sur l'apparition spontanée et fugace de paires particule-antiparticule, possible n'importe où et quand selon les lois de la mécanique quantique. Si une telle paire naît à proximité de l'horizon, l'un de ses membres peut tomber dans le trou noir et l'autre s'échapper. Ainsi, pour un observateur éloigné, le trou noir rayonne.

Ce rayonnement n'est pas en contradiction avec la relativité générale, mais il l'est avec le principe de conservation de l'information. En effet, le rayonnement de Hawking étant aléatoire, il ne peut exister de lien entre lui et la matière qui a formé le trou noir. Toute information éventuelle contenue dans la matière engloutie semble ainsi détruite.

La question est restée très débattue. Près de 20 ans plus tard, Juan Maldacena, de l'Université Harvard, a présenté un argument fort en faveur de la conservation de l'information, mais il restait à en comprendre le mécanisme. Une piste était de supposer que l'information est sauvegardée grâce à l'intrication de chaque paire particule-antiparticule avec l'ensemble du rayonnement de Hawking. L'intrication est un phénomène purement quantique où les états de deux particules (ou davantage) sont corrélés au point qu'elles forment un système indissociable, quelle que soit la distance qui les sépare.

Cependant, on montre que la particule d'une paire ne peut être intriquée simultanément avec son antiparticule et l'ensemble du rayonnement. J. Polchinski a donc supposé que l'intrication au sein de chaque paire est rompue près de l'horizon des événements. Il en résulterait une forte émission d'énergie, phénomène qui a été surnommé « pare-feu » *(firewall)*. Mais dans ce scénario, l'horizon devient une région particulière, en contradiction avec la relativité générale.

S. Hawking propose de résoudre les difficultés en supposant que, en raison de fluctuations quantiques, l'horizon des événements ne peut s'établir. Il y aurait malgré tout un horizon apparent, jouant le même rôle, mais sur des durées limitées. Ce serait grâce à cette instabilité que de la matière, donc de l'information, peut s'échapper du trou noir. Le scénario de S. Hawking est à l'étude, bien que de nombreux physiciens soient sceptiques.

→ Sean Bailly

S. Hawking, en ligne, 2014
http://arxiv.org/abs/1401.5761

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

Éthologie

Le radeau de la fourmi

Les fourmis placent leurs larves à la base du radeau pour améliorer sa flottabilité.

© Nathan D. David Hu / M Nowack

En cas d'inondation, les fourmis se rassemblent pour former des radeaux vivants. Le phénomène est bien connu chez les espèces qui vivent dans des plaines inondables. Mais ce qui l'est moins est la structure de ces radeaux : comment s'organisent les fourmis sur ces fragiles embarcations ? Certaines positions, telle la base du radeau, paraissent plus dangereuses, avec un risque élevé de mort par noyade.

L'équipe de Michel Chapuisat, de l'Université de Lausanne, a étudié en laboratoire la formation de ces radeaux chez la fourmi *Formica selysi*. Les chercheurs ont montré que la reine est la mieux protégée au centre du radeau. Mais, plus surprenant, les fourmis utilisent les larves et les pupes pour le fond de l'embarcation. Elles profitent du fait que ces individus immatures ont une densité plus faible, ce qui améliore la flottabilité du radeau. De plus, la mortalité des larves se révèle très faible. Cette structure bénéficie à l'ensemble du groupe en exposant peu la progéniture au danger. Mais certaines fourmis hésitent à participer à l'édifice, d'autres menaces pesant sur ces radeaux, telle la prédation.

→ S. B.

PLoS ONE, vol. 9(2), e89211, 2014

Neurobiologie

Les circuits cérébraux du geste juste

La réalisation d'un geste adéquat nécessite l'évaluation permanente des actions et, le cas échéant, leur correction. Par exemple, au tennis, si le joueur lance la balle en l'air trop haut durant le service, des commandes motrices adaptent le geste en cours de réalisation. Grâce à des enregistrements intracérébraux, Francesca Bonini, de l'Université d'Aix-Marseille, et ses collègues ont précisé le circuit cérébral responsable de l'évaluation de telles commandes.

L'activité cérébrale a été mesurée chez des patients épileptiques, à qui l'on avait inséré des électrodes dans le cerveau dans le cadre d'un examen neurochirurgical préparatoire. Les chercheurs ont soumis les patients à une tâche dite de Simon, où le circuit d'évaluation et de rectification des erreurs gestuelles est mis en œuvre. Ils ont révélé un rôle central de l'aire motrice supplémentaire, une aire cérébrale essentielle au déclenchement et à la planification des actions, située en avant du cortex moteur.

Le champion de tennis Roger Federer a-t-il un circuit cérébral d'évaluation des erreurs motrices particulièrement performant ?

© Neale Cousland/shutterstock.com

Il semble que ce soit cette aire qui évalue la pertinence des actions – et non la zone cingulaire rostrale, comme on le pensait auparavant ; cette zone est aussi impliquée, mais plus tard dans l'action. L'aire motrice supplémentaire s'active d'autant plus que la confiance envers le geste est faible. Selon Franck Vidal, l'un des participants à l'étude, également de l'Université d'Aix-Marseille, elle s'appuierait sur une « copie » des commandes motrices envoyées aux muscles pour simuler en quelque sorte le mouvement en cours et ainsi évaluer sa pertinence, sans même attendre les retours sensoriels. Ce circuit rapide d'évaluation des erreurs est essentiel pour ajuster les mouvements et aboutir à des gestes rapides et précis, tels ceux d'un sportif de haut niveau.

→ Guillaume Jacquemont

F. Bonini et al., Science, en ligne le 20 février 2014

En bref

Éléphants consolateurs

Bien que l'empathie soit une faculté assez répandue, peu d'animaux consolent et rassurent leurs congénères. C'est pourtant le cas des grands singes, des chiens, de certains oiseaux… Joshua Plotnik et Frans de Waal, de l'Université Emory aux États-Unis, ont aussi observé ce comportement chez les éléphants d'Asie, au sein d'un groupe de 26 animaux captifs. Quand un congénère semble inquiet, les autres viennent vers lui et le rassurent par des vocalisations particulières et des contacts apaisants.

Un oiseau géant herbivore

Après l'extinction des dinosaures, il y a 65 millions d'années, une lignée d'oiseaux du genre *Gastornis* a fourni les plus gros animaux de la Terre. Delphine Angst, du Laboratoire de géologie de Lyon, et ses collègues ont étudié l'insertion du muscle adducteur du bec de ces oiseaux hauts de deux mètres, et en ont déduit qu'ils arrachaient et broyaient des végétaux avec une grande force. Ils ont également confirmé leur régime herbivore en mesurant le rapport isotopique $^{13}C/^{12}C$ de leurs os.

Un cimetière de chiens

Pour la première fois, des archéologues de l'Institut mexicain d'anthropologie et d'histoire ont découvert un cimetière aztèque de chiens à Mexico. Sous une rue de la ville actuelle, ils ont mis au jour 12 squelettes de chien complets et bien préservés. Une poterie trouvée dans la même strate a permis de dater le cimetière entre 1350 et 1520. Les chiens jouaient un grand rôle dans la mythologie aztèque, mais rien n'indique que ceux que l'on vient de découvrir aient reçu un traitement particulier.

Brève d'avril

D'inhabituelles vagues sur les berges

De galantes baigneuses folles de surf qu'on ne peut plus qu'arrêter s'agitent à l'arrivée de terribles embruns et de tempêtes interdisant les pédalos. Quelques furieux crawleurs attirés peinent. On voit un amateur de planche en manque, un cavalier a peur, fou de trot et de Pornic... Un pêcheur au petit matin n'a pu retirer sa pêche du flot. D'autres pêcheurs épuisés par trop de luttes se fâchent car leurs lignes cassées leur font perdre leur latin. D'énormes houles accompagnées d'écume se déversent sur les plages. D'incroyables rouleaux ravagent les sables, et en masse brisent des falaises abaissées. Les touristes privés des plaisirs de la mer sont chassés… De soi-disant experts en climat toqués arborent leurs choix en niant: pour eux, les hommes s'abusent en pensant faire chauffer leur Terre aussi facilement qu'une petite chape. Alors pourquoi tant de signes montrent qu'on a failli ? Et pourquoi ce gros temps qui sévit sans cesse, bande de falots ?

(28 contrepèteries, titre compris)

Le 1er avril, vous trouverez sur notre site quelques indices pour résoudre les contrepèteries de Maël Jortin.

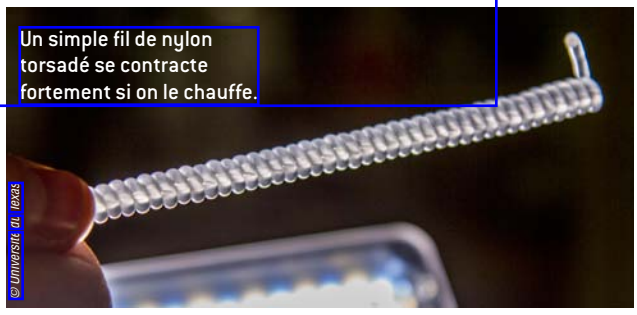
www.pourlascience.fr

Ces deux plantes montrent des différences de floraison *(précoce à gauche, tardive à droite)* dues à des variations épigénétiques héréditaires.

Science des matériaux

Des muscles artificiels en... fil de pêche

Les prototypes de robots humanoïdes intègrent en général des systèmes qui s'inspirent du corps humain. Des muscles artificiels assurent par exemple la motricité. Une équipe internationale menée par Ray Baughman, de l'Institut de nanotechnologie à l'Université du Texas, vient de démontrer que le fil de pêche est un excellent candidat pour reproduire l'action des muscles biologiques.



Un simple fil de nylon torsadé se contracte fortement si on le chauffe.

© University of Texas

De nombreux matériaux ont été étudiés pour mettre au point des muscles artificiels : métaux ou polymères à mémoire de forme, fibres à base de nanotubes de carbone, polymères conducteurs, etc. Mais ils présentent tous des inconvénients : coût prohibitif, usure rapide ou hystérésis importante – la tendance à conserver la forme atteinte après une déformation. R. Baughman et son équipe ont montré que des fibres torsadées de nylon ou de polyéthylène présentent des avantages en terme de coût, d'hystérésis et de longévité, mais aussi de performances : elles dépassent celles des muscles des mammifères.

Comment est-ce possible ? Les fils de nylon ou de polyéthylène se contractent en chauffant, mais peu. En enroulant les fils sur eux-mêmes, les chercheurs ont montré que la contraction des fibres ainsi obtenues est beaucoup plus forte : 34 pour cent pour le nylon chauffé à 240 °C et 16 pour cent pour le polyéthylène chauffé jusqu'à 130 °C (le polyéthylène est limité par une température de fusion plus basse que le nylon). Si le polyéthylène se contracte moins, il est cependant plus résistant, un avantage pour concevoir des muscles destinés à soulever des masses importantes. Enfin, le phénomène est réversible : en refroidissant, les fibres torsadées retrouvent leur longueur initiale.

→ S. B.

C. S Haines et al., Science, vol. 343, pp. 868-872, 2014

Biologie végétale

Hérédité épigénétique de caractères complexes

Comment se transmettent les caractères complexes, liés à un grand nombre de gènes et à leurs interactions ? À côté des mécanismes génétiques classiques, on sait que des modifications dites épigénétiques, qui modulent l'expression d'un gène sans modifier sa séquence, peuvent être transmises à la descendance : on parle alors d'hérédité épigénétique.

Pour la première fois, des chercheurs de l'Institut de biologie de l'École normale supérieure, à Paris, et du Centre de bio-informatique de Groningen, aux Pays-Bas, ont montré que l'hérédité épigénétique peut expliquer la transmission de caractères complexes.

Le mécanisme épigénétique concerné est la méthylation de l'ADN. Il correspond à la fixation de groupes chimiques (méthyle) le long du génome, qui modifient l'accessibilité de l'ADN lors de la phase de transcription. En général, plus une portion du génome est méthylée, moins elle est exprimée.

Grâce à une mutation particulière, Vincent Colot et ses collègues ont mis au point une lignée de plantes *(Arabidopsis thaliana)* ayant le même génome, mais des profils de méthylation différents. Ils ont ensuite pu établir que les différences de méthylation expliquent respectivement 60 et 90 pour cent des variations héritables de deux caractères complexes : la taille de la racine et la période de floraison.

Quelle est la portée de ces résultats ? À elles seules, les variations de la séquence d'ADN ne suffisent pas à expliquer l'héritabilité des caractères complexes. Les mécanismes épigénétiques étaient une piste possible pour fournir une explication plus complète. Ce point restait incertain, le voici démontré… en environnement contrôlé. Dans la nature, la question reste ouverte.

→ Yvan Pandelé

S. Cortijo et al., Science Express, en ligne le 6 février 2014

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

Géophysique

Un point chaud complexe

L'archipel des Galápagos est un ensemble d'îles volcaniques formé à partir d'un point chaud, zone où remonte un panache de roches chaudes en provenance du manteau terrestre. Douglas Toomey, de l'Université de l'Oregon, et ses collègues ont étudié la structure de ce point chaud par une technique tomographique fondée sur des ondes sismiques, qui permettent de sonder le panache à très grande profondeur.

En général, le panache est dévié à quelques dizaines de kilomètres de profondeur dans la direction de déplacement de la plaque de la croûte terrestre qu'il traverse. Ici, la présence d'une dorsale peu éloignée du point chaud contribue à dévier le panache bien plus profondément, à environ 150 kilomètres de la surface. Il s'ensuit une séparation inhabituelle des différentes roches du panache, qui sont plus ou moins déviées vers la dorsale en fonction de leur viscosité et de leur composition. Grâce à ce scénario, on comprend mieux la composition des roches de surface, qui semblaient présenter des anomalies.

→ S. B.

D. R. Villagómez et al., Nature Geoscience, en ligne le 19 janvier 2014

© Pbtt

L'île volcanique de Bartolomé, dans l'archipel des Galápagos.

Parasitologie

Paludisme : un agent africain

Le parasite *Plasmodium vivax*, responsable de la forme la plus répandue de paludisme (l'autre est due à *P. falciparum*), constituait une énigme : alors que seuls les Africains ont développé une résistance vis-à-vis de cet agent de la maladie, son étude phylogénétique suggérait qu'il était apparu… en Asie, l'une des principales régions touchées. Une équipe internationale vient de résoudre ce paradoxe : *P. vivax* serait d'origine africaine. Les biologistes ont découvert, dans l'ADN des excréments de chimpanzés et gorilles sauvages d'Afrique centrale, des traces de parasites proches des souches humaines. Leur analyse phylogénétique indique que les souches humaines forment une lignée dérivée d'un ancêtre des parasites simiens. Il y a plus de 30 000 ans, des primates africains auraient infecté les populations humaines locales, qui auraient développé une résistance. Les parasites humains actuels seraient issus d'un unique ancêtre échappé d'Afrique.

→ Marie-Neige Cordonnier

W. Liu et al., Nature Communications, en ligne le 21 février 2014

Paléontologie humaine

Homo erectus, deux fois sorti d'Afrique

La nouvelle datation d'un fossile découvert en 2002 suggère qu'après une première sortie d'Afrique de *Homo erectus*, il y a plus de 1,6 million d'années, une deuxième a suivi, il y a environ 1,2 million d'années.

En datant le plus vieil hominidé découvert en Turquie, l'hominidé de Kocabaş, Anne-Élisabeth Lebatard, de l'Université d'Aix-Marseille, et des collègues français et turcs viennent d'apporter une information essentielle sur la colonisation par *H. erectus*, qui a précédé celle des hommes modernes.

En 2002, Mehmet Cihat Alçiçek, de l'Université de Pamukkale, avait mis au jour des fragments de calotte crânienne à Denizli (Turquie) dans une carrière de travertin (tuf calcaire) proche du site naturel de Pamukkale. L'analyse de ces ossements avait suggéré qu'ils appartiennent à une forme de *H. erectus* plus proche de ceux d'Éthiopie (datés entre 1 million et 1,6 million d'années) que des *H. erectus* trouvés en Géorgie (1,8 million d'années) et en Chine (0,8 million d'années). L'hominidé de Kocabaş semble donc avoir appartenu à une population africaine en train de s'étendre au-delà du Sinaï, plutôt qu'aux souches de *H. erectus* déjà présentes en Eurasie. Pour autant, ce tableau était troublé par les premières datations, qui donnaient au fossile un âge de 0,5 million d'années.

Cependant, les chercheurs n'y croyaient guère, car les techniques de datation par résonance paramagnétique électronique et par thermoluminescence utilisées pour dater les roches enserrant les fragments osseux avaient été poussées à leur limite de fiabilité. Après avoir retrouvé la strate du fossile, ils ont daté par plusieurs méthodes la précédente et la suivante. Ils sont ainsi parvenus à la conclusion que le bloc de travertin où se situait le fossile date de 1,1 à 1,3 million d'années.

L'âge de l'hominidé de Kocabaş suggère ainsi qu'il a fait partie d'une population de *H. erectus* qui, autour de 1,2 million d'années, s'est étendue de l'Afrique de l'Est jusqu'à la Turquie, et a pu participer à la colonisation de l'Europe.

→ François Savatier

Earth and Planetary Science Letters, vol. 390, pp. 8-18, 2014

Amelie Vialet, MNHN

Les fragments de calotte crânienne découverts en 2002.

Climatologie

Un effet modéré des éoliennes sur le climat

Le brassage de l'air par les éoliennes peut-il modifier le climat ? D'après une étude de Robert Vautard, du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CNRS/CEA/UVSQ) et ses collègues, l'effet des parcs éoliens serait très modéré, du moins en Europe.

Pour aboutir à cette conclusion, les chercheurs ont simulé l'impact des éoliennes sur le climat européen en s'appuyant sur un scénario réaliste, qui prévoit un doublement de la production éolienne en Europe d'ici 2020. Selon les résultats de ces simulations, significatifs seulement en hiver, les éoliennes entraîneraient un réchauffement maximal de 0,3 °C autour de la mer Baltique et un refroidissement de même ampleur en Europe du Sud. Le volume des précipitations hivernales devrait aussi diminuer de moins de cinq pour cent selon les régions.

Ces conclusions viennent tempérer celles d'études précédentes, qui se fondaient notamment sur des scénarios d'implantation moins réalistes. Les conséquences de l'implantation d'éoliennes sont ainsi très limitées en regard des variations interannuelles et du réchauffement climatique lié à l'effet de serre. Reste à évaluer des scénarios à plus long terme, car l'Union européenne prévoit de renforcer encore l'implantation d'éoliennes dans sa feuille de route à l'horizon 2050.

→ Y. P.

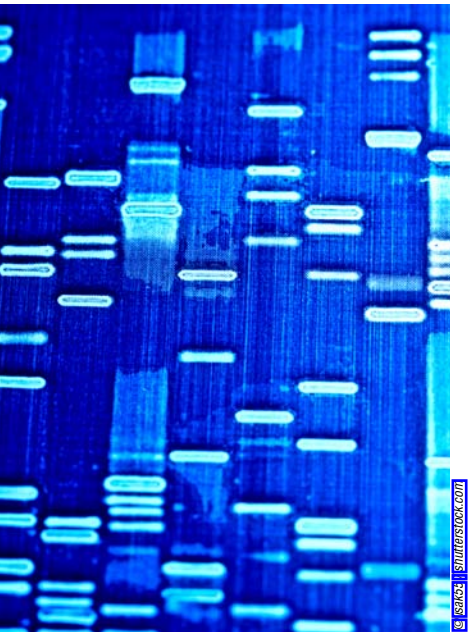
Nature Communications, en ligne le 11 février 2014

Les éoliennes provoquent des turbulences qui accentuent le brassage vertical de l'air dans leur sillage, et finissent par modifier légèrement la circulation des vents.

10 mètres de long : *Torvosaurus gurneyi*, découvert au Portugal, est à ce jour le plus grand dinosaure carnivore ayant vécu en Europe.

Médecine

Cancer du sein avancé : vers une médecine personnalisée



Analyse de l'ADN d'un échantillon par électrophorèse.

Le cancer du sein métastatique, forme avancée de la maladie, est une des principales causes de mortalité liée au cancer dans le monde. En 2008, l'Union européenne comptait 332 000 nouveaux cas de cancer du sein et 89 000 décès liés à cette maladie. Environ 5 à 10 pour cent des cancers sont métastatiques au diagnostic et, parmi eux, la probabilité de survie à cinq ans est de 20 pour cent. L'efficacité des traitements généraux (chimiothérapie, hormonothérapie) sur ces cancers a peu progressé, et les espoirs se portent sur la médecine personnalisée – la recherche d'un traitement propre à chaque patiente, déterminé notamment en fonction des spécificités génétiques et biologiques de sa tumeur.

Un premier pas dans cette direction a été franchi par Fabrice André, de l'Institut Gustave Roussy, à Villejuif (U981, INSERM-Université Paris-Sud) et ses collègues. Par une étude à grande échelle, les cancérologues ont montré qu'une démarche de médecine personnalisée peut être intégrée aux structures cliniques, permettre l'accès à des traitements ciblés, et fournir des résultats encourageants.

Entre juin 2011 et juillet 2012, des biopsies des métastases de 423 patientes atteintes d'un cancer du sein métastatique ont été effectuées, suivies d'une analyse du génome des cellules prélevées. Cette analyse a permis d'identifier des modifications génétiques fréquentes dans ce type de cancer, mais aussi d'autres plus rares. Pour 46 pour cent des patientes, les modifications génétiques pouvaient être ciblées par un traitement. Un an après, 55 d'entre elles avaient reçu un traitement ciblé à la suite de cette analyse. Parmi elles, quatre ont vu leur état s'améliorer, et neuf autres leur maladie se stabiliser pendant plus de 16 semaines.

La méthode est loin de fournir un traitement ciblé et efficace à la majorité des patientes. Néanmoins, elle montre qu'il est possible de concilier médecine personnalisée et approche clinique.

Une difficulté est l'hétérogénéité des populations de cellules cancéreuses d'un même patient. Les biopsies ne reflètent sans doute qu'une partie de cette diversité. Pour que cette démarche devienne efficace, d'autres approches de médecine personnalisée devront lui être associées, telles que la quantification de l'hétérogénéité des métastases et l'immunothérapie.

→ M.-N. C.

F. André et al., Lancet Oncol., en ligne le 7 février 2014

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

Environnement

Le pétrole, nocif pour le cœur

De nombreuses études ont montré que les poissons exposés au pétrole répandu lors des marées noires sont victimes de troubles mortels du rythme cardiaque. Fabien Brette, de l'Université Stanford, aux États-Unis, et ses collègues ont découvert l'un des mécanismes en cause.

Les chercheurs ont cultivé des cellules musculaires de cœur de deux espèces de thons. Leur contraction est provoquée par des flux d'ions à travers la membrane (*via* des canaux ioniques), qui activent des fibres contractiles. En enregistrant ces flux dans les cellules *in vitro*, les chercheurs ont montré que le pétrole bloque certains canaux, tels ceux qui laissent passer le potassium. C'est ce qui perturberait la régularité des contractions du cœur. Les mécanismes de contraction étant voisins chez tous les vertébrés, les chercheurs s'attendent à ce que de nombreuses autres espèces que les thons soient touchées.

→ G. J.

F. Brette et al., Science, en ligne le 13 février 2014

L'activité cardiaque des thons est perturbée par les composés toxiques du pétrole.

Géosciences

Dater la croûte terrestre

La Lune s'est formée à la suite d'une collision entre la Terre et un astre de la taille de Mars, il y a un peu plus de 4,5 milliards d'années. La surface de la Terre s'est ensuite refroidie et une croûte s'est formée. Les travaux de John Valley, de l'Université du Wisconsin, et ses collègues confirment l'âge de cette croûte.

Des zircons, des minéraux du groupe des silicates, se sont formés en même temps que la croûte et en sont les derniers vestiges. Une méthode radiométrique, fondée sur le rapport des concentrations de l'uranium et du plomb, permet de les dater. Mais elle était contestée, car la diffusion des atomes de plomb dans le cristal aurait pu la fausser. Or J. Valley et ses collègues ont montré que le déplacement des atomes crée des agrégats de plomb trop petits pour influer sur la mesure des concentrations. Certains zircons prélevés en Australie seraient ainsi vieux de 4,374 milliards d'années. La croûte terrestre se serait donc formée à peine 100 millions d'années après la Lune.

→ S. B.

J. Valley et al., Nature Geoscience, en ligne le 23 février 2014

Cosmologie

Des neutrinos massifs, clef d'une énigme cosmologique

La distribution des galaxies dans l'Univers, telle qu'on l'observe, n'est pas en accord avec les prévisions fondées sur l'étude du rayonnement du fond diffus cosmologique, la lumière émise par l'Univers âgé de 380 000 ans. Par rapport aux observations, les calculs prévoient deux fois plus de grandes structures regroupant de nombreuses galaxies. Richard Battye, de l'Université de Manchester, et Adam Moss, de l'Université de Nottingham, suggèrent que les neutrinos, des particules élémentaires, seraient responsables de cette différence.

Le satellite *Planck* a mesuré le rayonnement du fond diffus cosmologique. Ce dernier est altéré lorsqu'il passe près des amas de galaxies, ce qui permet d'estimer leur distribution. Par ailleurs, les observations du fond diffus cosmologique par *Planck* renseignent sur les conditions qui régnaient dans l'Univers primordial. C'est en extrapolant à partir de ces conditions la formation et l'évolution des amas de galaxies que les cosmologistes trouvent qu'il devrait y en avoir deux fois plus qu'observé.

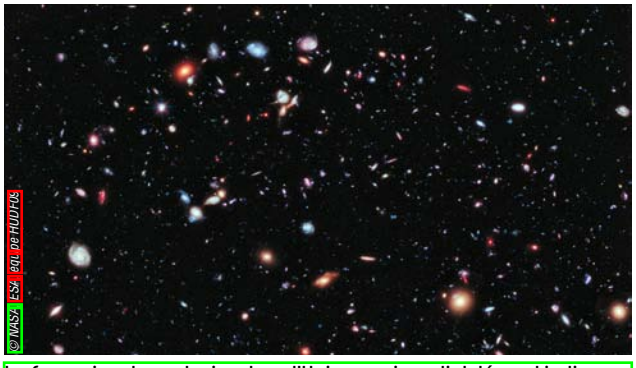
L'équipe de *Planck* a suggéré que si les neutrinos sont plus massifs qu'on ne le pensait, cela pourrait corriger l'extrapolation. En effet, les neutrinos interagissent peu avec la matière. Ils ne participent donc pas à la formation des amas de galaxies et s'échappent de ces régions. Leur masse totale constitue autant de matière perdue pour la formation des amas. Par conséquent, si la masse des neutrinos est sous-estimée dans l'extrapolation, la production d'amas galactiques est surestimée.

Or la masse des neutrinos n'est pas connue avec précision : les physiciens n'ont cerné qu'un intervalle de valeurs possibles, inférieures à l'électronvolt. Deux physiciens de la collaboration *Planck*, R. Battye et A. Moss, ont estimé que la somme des masses des trois types de neutrinos connus doit être d'environ 0,32 électronvolt pour résoudre le conflit. Une autre solution serait l'existence d'un quatrième type de neutrino, dit stérile car il interagirait encore moins avec la matière que les autres neutrinos.

Des précisions sur la masse des neutrinos pourraient venir des expériences de physique des particules T2K, au Japon, ou NOvA, qui vient de démarrer aux États-Unis.

→ S. B.

R. A. Battye et A. Moss, Physical Review Letters, vol. 112, 051303, 2014



La formation des galaxies dans l'Univers primordial dépend indirectement de la masse des neutrinos, qui est mal connue.

En bref

Invasion de vers plats

Les transports modernes amènent souvent des espèces animales ou végétales exotiques, qui entrent en compétition avec les espèces locales et déséquilibrent l'écosystème. Dernier exemple en date : le ver plat (ou plathelminthe) *Platydemus manokwari*, qui vient d'être repéré en France. Originaire de Nouvelle-Guinée, il est particulièrement vorace. Il est capable de se nourrir des escargots communs européens et pourrait étendre son régime aux vers de terre.

Pierre Gros

Silhouettes sonores

La vision est-elle nécessaire pour se représenter la posture d'un individu ? Non, répondent des neurobiologistes de l'Université hébraïque de Jérusalem. Ils ont appris à des adultes aveugles de naissance à percevoir des silhouettes humaines *via* un logiciel qui traduit une image en un « paysage » sonore. Après plusieurs mois d'apprentissage, ces personnes étaient capables d'identifier et de reproduire la posture d'une silhouette. Comme chez les individus ayant une vue normale, ce processus activait chez les non-voyants une région du cortex visuel spécialisée dans la perception des parties du corps, ce qui suggère que cette région se construit indépendamment de la vision.

Neurobiologie

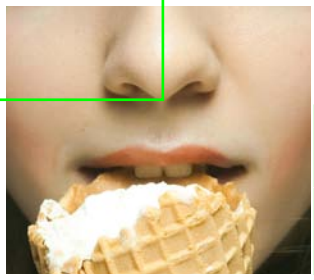
Bonne odeur, appétit et cannabinoïdes

Qui n'a jamais eu l'eau à la bouche en humant l'odeur des croissants chauds devant une boulangerie ? Cette attraction est d'autant plus irrésistible que l'on a faim. L'équipe de Giovanni Marsicano, du Neurocentre Magendie (INSERM Bordeaux), a montré sur des souris que ce lien entre la faim et l'augmentation de l'attirance pour les bonnes odeurs résulte de l'action des cannabinoïdes. Cette famille de substances comprend le THC, la molécule active du cannabis, mais aussi plusieurs molécules naturellement synthétisées dans le cerveau.

Chez une souris repue, un mécanisme inhibiteur commandé par diverses aires corticales atténue les réponses du bulbe olfactif. Les neurobiologistes ont montré que les cannabinoïdes inhibent... ce mécanisme inhibiteur. La concentration des cannabinoïdes est assez faible quand on a mangé peu de temps auparavant, mais elle augmente après un jeûne, qui en active la synthèse. La réponse du bulbe olfactif à la perception d'une odeur s'accroît d'autant, ce qui intensifie la sensation de faim et la prise de nourriture.

Ainsi, après un jeûne, des souris modifiées génétiquement de façon que les cannabinoïdes ne puissent agir dans le bulbe olfactif se nourrissaient moins que des souris normales. Le même effet était observé lorsqu'on bloquait cette action par des substances pharmacologiques. Ce manque d'appétit résulterait d'une perception moins intense des odeurs, elle-même due au mécanisme inhibiteur, qui persiste en l'absence d'action des cannabinoïdes.

Ces résultats pourraient inspirer la conception de médicaments contre les troubles du comportement alimentaire, telles l'obésité ou l'anorexie. Ces médicaments agiraient ponctuellement sur les récepteurs des cannabinoïdes dans le bulbe olfactif pour moduler la sensation de faim.



© Shutterstock, Kalsa Kanareva

Une odeur est perçue comme d'autant plus intense qu'il y a de cannabinoïdes dans le cerveau – lequel en fabrique davantage en cas de jeûne.

→ G. J.

E. Soria-Gómez et al., Nature Neuroscience, en ligne le 9 février 2014

Mathématiques

Équations de Navier-Stokes : une preuve difficile

Les équations dites de Navier-Stokes sont utilisées pour décrire et calculer, au moins de façon approchée, les écoulements de fluides. Mais ont-elles, au moins en théorie, des solutions régulières, c'est-à-dire où les grandeurs telles que la vitesse du fluide ne tendent pas vers l'infini au bout d'un temps fini ? Même dans des situations simples, on l'ignore. Cela constitue l'un des sept « problèmes du millénaire » mis à prix en 2000 par l'Institut Clay.

Au début de 2014, un mathématicien kazakh, Mukhtarbay Otelbaev, a proposé une preuve de la régularité des solutions des équations de Navier-Stokes, suscitant un enthousiasme médiatique. Mais, depuis, un contre-exemple a été trouvé à un résultat intermédiaire de sa démonstration. Qui plus est, Terence Tao, de l'Université de Californie à Los Angeles, vient d'obtenir un résultat suggérant que ces équations n'auraient pas toujours des solutions régulières.

T. Tao s'est intéressé à la conservation de l'énergie, qui est l'une des propriétés contenues dans les équations de Navier-Stokes. Les mathématiciens ignorent si elle joue un rôle dans la régularité des solutions. Les modèles simples étudiés jusqu'ici, qui présentaient des divergences en un temps fini, n'incluaient pas la conservation de l'énergie. T. Tao a développé un modèle apparenté aux équations de Navier-Stokes et où l'énergie est conservée, et a montré que la solution diverge en un temps fini.

Cela indique que la conservation de l'énergie ne suffit pas à garantir la régularité des solutions. Cependant, les techniques développées par T. Tao ne s'appliquent pas exactement aux équations de Navier-Stokes, du moins pour l'instant. Le problème reste donc ouvert.

→ S. B.

T. Tao, en ligne, 2014, http://arxiv.org/abs/1402.0290

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

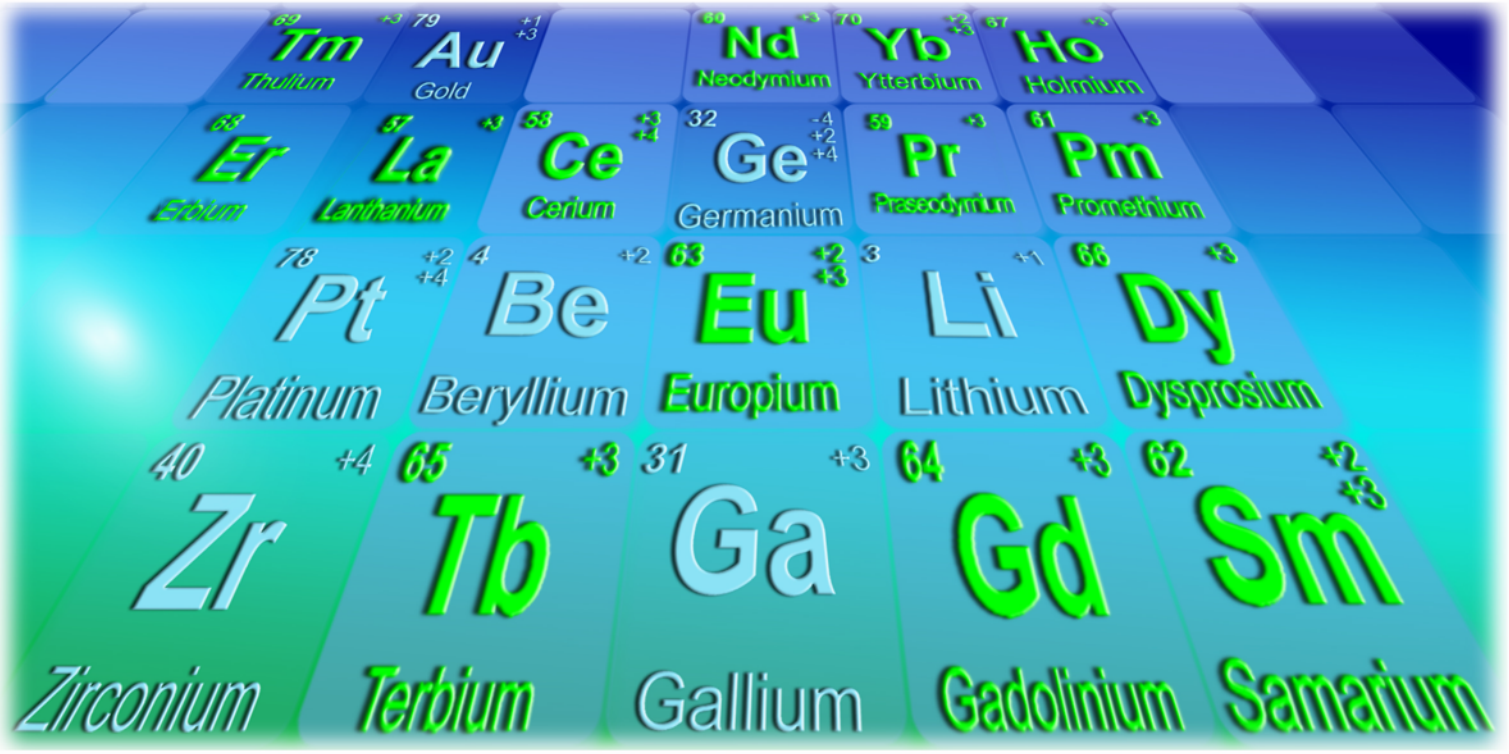
FONDATION ÉCOLOGIE D'AVENIR

INSTITUT DE FRANCE

COLLOQUE

TERRES RARES ET MÉTAUX RARES: ENJEUX DU XXIème SIÈCLE?

SOUS LA DIRECTION DE **PASCAL COLOMBANI** ET **CHRISTIAN AMATORE**



Avec la participation de :

Georges Calas (Université Paris VI), **Patrice Christmann** (BRGM),
Jacques Lucas (Academie des sciences/Université Rennes I),
Alain Rollat (Solvay), **Vincent Trelut** (ERAMET).

jeudi 15 mai 2014

15H-19H

LA MAISON DU BARREAU
4 RUE DE HARLEY - 75001 PARIS

WWW.FONDATIONECOLOGIEDAVENIR.ORG

Entrée gratuite - réservation obligatoire

Physique

Une masse plus précise pour l'électron

La masse de l'électron est l'un des paramètres fondamentaux du modèle standard de la physique des particules, raison pour laquelle Sven Sturm, de l'Institut Max Planck pour la physique nucléaire de Heidelberg, en Allemagne, vient avec des collègues d'en effectuer une nouvelle mesure – la plus précise jamais réalisée.

Toutefois, les chercheurs n'ont pas mesuré la masse d'un électron libre, mais la masse d'un électron lié à un noyau de carbone 12. Pour ce faire, ils ont utilisé un piège à ion de Penning, dispositif qui combine un champ électrique et un champ magnétique pour maintenir l'ion en place. L'atome de carbone, débarrassé de tous ses électrons sauf un, y parcourt un cercle perpendiculaire au champ magnétique avec une fréquence dite cyclotronique et inversement proportionnelle à sa masse. Dans le même temps, le spin de l'électron (son moment cinétique, ou magnétique, intrinsèque) se met à tourner autour du champ magnétique. Nommé précession de Larmor, ce mouvement du spin est caractérisé par une fréquence proportionnelle à un facteur dit de Landé et inversement proportionnelle à la masse de l'électron. Pourvu que le facteur de Landé soit bien connu, la mesure du rapport des deux fréquences permet de déduire le rapport entre la masse de l'électron lié et celle de l'ion.

Pour le rapport des deux fréquences, les physiciens ont utilisé un facteur de Landé corrigé, qui tient compte des corrections très précises calculées par les théoriciens. Ils ont aussi adapté le calcul du facteur de Landé, connu pour un électron libre, au cas d'un électron lié se trouvant dans le potentiel électrique d'un noyau. Ils sont ainsi parvenus à la conclusion que le proton est 1 836,152 673 77 fois plus massif que l'électron. Par rapport à la dernière mesure de la masse électronique, ils ont ainsi divisé par 13 l'imprécision due aux erreurs statistiques et systématiques.

→ F. S.

S. Sturm et al., Nature, vol. 506, pp. 467-470, 2014

Neurosciences

Un lien entre microglie et autisme ?

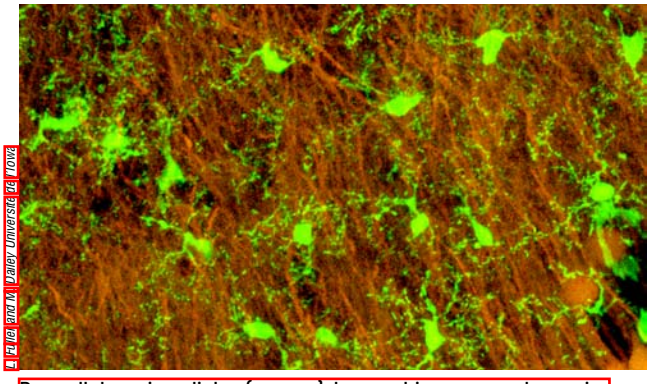
Un déficit en cellules microgliales – des cellules immunitaires impliquées dans la maintenance et la réparation du cerveau – pourrait-il suffire à provoquer des troubles des interactions sociales et des comportements stéréotypés, tels ceux observés chez les personnes autistes ? Une étude menée sur des souris par Yang Zhan et ses collègues, du Laboratoire européen de biologie moléculaire de Monterotondo, en Italie, le suggère.

Les chercheurs ont inactivé un gène impliqué dans la prolifération des cellules microgliales lors du développement, provoquant un déficit en microglie dans le cerveau des souriceaux nouveaunés. Les rongeurs devenus adultes présentaient une « connectivité fonctionnelle » réduite : l'activité de zones cérébrales distantes était moins bien synchronisée. De plus, les souris nouaient peu d'interactions sociales et avaient des comportements répétitifs.

Ainsi, une perturbation précoce de la microglie peut aboutir à une structuration anormale du cerveau, qui persiste à l'âge adulte et altérerait les comportements sociaux. Une piste d'étude pour les troubles du développement neurologique associés à un défaut de connectivité neuronale, tels que la schizophrénie ou l'autisme...

→ Y. P.

Nature Neuroscience, 2 février 2014



Yan Wang and Mary Kay Lobas, University of Texas

Des cellules microgliales *(en vert)* dans un hippocampe de souris.

DERNIÈRE minute...

LA SOURCE DE MÉTÉORITES MARTIENNES

De quels cratères d'impact sur Mars sont originaires les météorites martiennes trouvées sur Terre ? Une équipe franco-norvégienne l'a déterminé pour certaines d'entre elles – des roches éjectées il y a entre un et dix millions d'années. Les chercheurs ont montré que le cratère Mojave, de 55 kilomètres de diamètre, est probablement le berceau de ces roches, car il est jeune et sa composition est similaire. Cette étude a aussi permis de confirmer l'âge ancien de ces météorites, qui est celui de la croûte rocheuse sous le cratère, soit environ 4,2 milliards d'années.

UN MASTODONTE... MICROSCOPIQUE

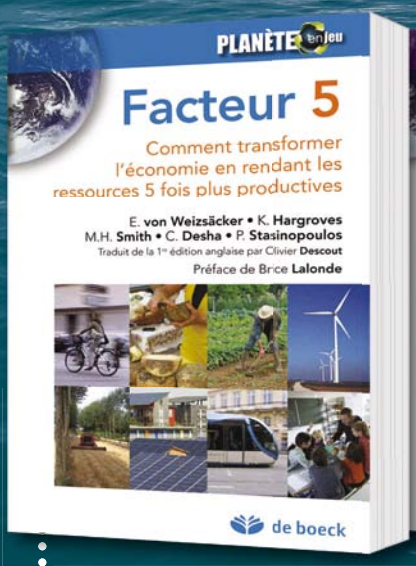
Le virus le plus gros à ce jour a été découvert dans un échantillon de pergélisol sibérien par Jean-Michel Claverie, de l'Université de Marseille, et plusieurs autres chercheurs. Nommé *Pithovirus sibericum*, il mesure 1,5 micromètre de long, est âgé de 30 000 ans et est encore capable d'infecter… des amibes. Muni d'une enveloppe en forme d'amphore et d'un génome de taille plutôt modeste, il est le prototype d'une nouvelle famille de virus géants, la troisième. Incidemment, cette découverte pose la question de ce que nous réserve la fonte du pergélisol…

Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

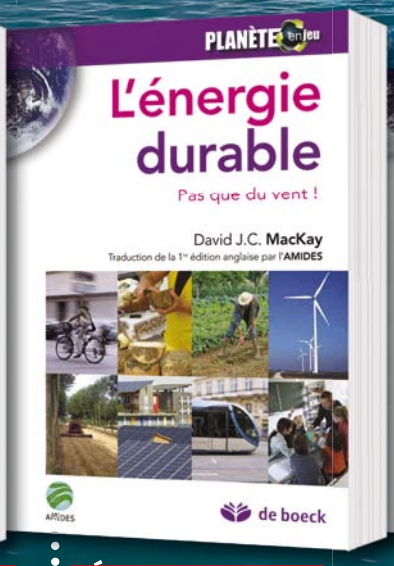
RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET IMPACT DE L'ÉCONOMIE SUR L'ENVIRONNEMENT

Planète en jeu : des lectures d'actualité.



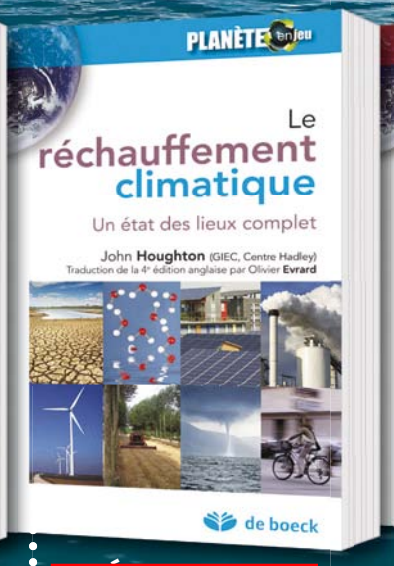
FACTEUR 5
Weizsäcker E., Hargroves K., Smith M., Desha C., Stasinopoulos P.
Préface : Lalonde B.

Rendre les ressources 5 fois plus productives, c'est possible et c'est rentable ! Les technologies existent déjà, il suffit de les utiliser. C'est ce que démontrent les auteurs de «Facteur 5»,en illustrant leur propos par des dizaines d'exemples concrets.
504 p. • Éd. 2013 • 35 €



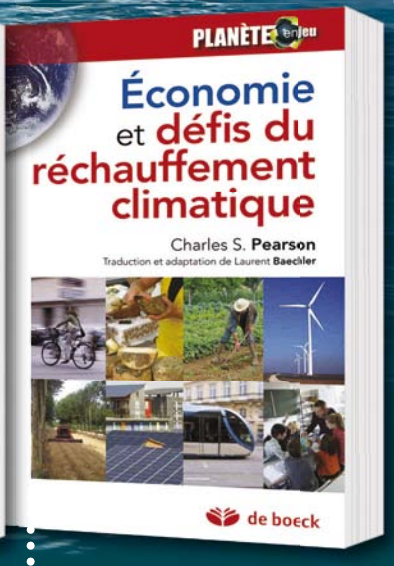
L'ÉNERGIE DURABLE
MacKay D.

Un ouvrage majeur sur les enjeux et les options énergétiques du développement durable, soutenus par une argumentation scientifique claire et objective. Un livre indispensable.
504 p. • Éd. 2012 • 36 €



LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE
Houghton J.

À la fois rigoureux et accessible, abondamment illustré et documenté, cet ouvrage de référence fait le bilan de nos connaissances sur le changement climatique, sur ses impacts et sur les solutions à apporter pour l'atténuer.
496 p. • Éd. 2011 • 52.50 €



ÉCONOMIE ET DÉFIS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE
Pearson C.

Une somme indispensable pour comprendre les défis auxquels fait face la communauté internationale dans le domaine climatique, après la fin du protocole de Kyoto.
224 p. • Éd. 2013 • 32 €

En librairie ou sur *www.deboeck.fr*

de boeck

POINT DE VUE

Agir pour rendre l'université plus attractive

En France, comment renforcer l'attrait des filières scientifiques des universités, pour les filles autant que pour les garçons ? En multipliant les approches et les actions concrètes.

Bertrand MONTHUBERT

En janvier 2014, lorsque le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche a ouvert la procédure annuelle d'*Admission Post-Bac*, qui permet aux candidats bacheliers de former des vœux d'orientation, il a aussi lancé une campagne de communication pour vanter les mérites de la formation à l'université. C'était une première tout à fait bienvenue. Car l'attractivité de nos établissements, en particulier dans les filières scientifiques, est depuis de trop nombreuses années insuffisante. Le nombre de bacheliers qui s'inscrivent aujourd'hui à l'université dans les filières scientifiques (hors médecine) est retombé au niveau de 1987… alors que le nombre de bacheliers scientifiques a progressé de 50 pour cent !

Certes, on peut se réjouir de quelques évolutions récentes positives. Ainsi, en 2012-2013, l'Université Paul Sabatier que je préside comptait 1,4 pour cent d'étudiants de plus que l'année précédente, tandis qu'au niveau national on enregistrait une hausse des inscriptions de 0,8 pour cent. Mais ces chiffres positifs ne doivent pas masquer une réalité, celle d'une désaffection envers l'université, pour les sciences en particulier.

Par exemple, le nombre d'étudiants en troisième année de licence de mathématiques à l'Université Paul Sabatier (qui compte le plus gros laboratoire de mathématiques hors Paris) est d'une centaine ; en physique, le chiffre est de 150 ; en informatique (au sens large), il est de 250. Ces effectifs sont très bas en regard des débouchés de ces filières (métiers classiques tels qu'enseignement, ingénierie, études statistiques, etc., mais aussi nouveaux métiers en liaison avec le traitement de données massives, l'imagerie médicale, etc.).

Comme l'indique une récente enquête publiée par le ministère de l'Enseignement supérieur, 95 pour cent de nos diplômés de master en sciences, technologie et santé ont trouvé un emploi dans les 30 mois qui ont suivi l'obtention de leur diplôme (la moyenne nationale est de 91 pour cent).

LE NOMBRE DE BACHELIERS
qui s'inscrivent aujourd'hui à l'université dans les filières scientifiques est retombé au niveau de 1987…

Cet indicateur souligne l'intérêt de ces formations et conforte notre volonté de renforcer l'attractivité des filières scientifiques et technologiques. Mais cette question doit être prise en charge au-delà de l'université, et en particulier dès le secondaire. Car les conséquences touchent tout le monde : pénurie d'enseignants dans certaines disciplines au collège et au lycée, difficulté des entreprises à recruter dans certains métiers.

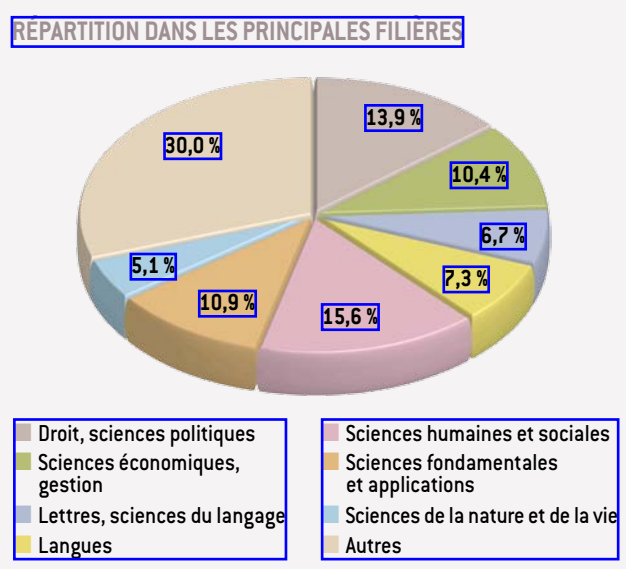
L'une des principales raisons de ce contournement de l'université me semble être la mauvaise connaissance de ce qu'elle offre et de ses débouchés. Aussi, en lien avec le rectorat et les proviseurs, nous multiplions l'accueil de classes de première des lycées de la région, nous organisons des *Journées portes ouvertes* pour les lycéens et leurs familles et, pour les plus jeunes, nous développons des séquences ludiques, les « rallyes mathématiques ». Nous ouvrons les portes de l'université pour des événements visant le grand public. Nous innovons en développant des *fab labs* (ateliers de fabrication ouverts à tous, fondés sur une charte commune à leur réseau) en lien avec des associations de culture scientifique et technique.

Mais il faut aller au-delà et promouvoir une « orientation renforcée », notamment par le biais d'un service téléphonique d'information sur les filières, les débouchés, etc., pour mieux accompagner les lycéens au moment du choix des études supérieures, où les *a priori* erronés sont légion.

Nous agissons plus en amont encore. Dans l'esprit des expérimentations de la Fondation *La main à la pâte*, qui ont commencé dans les années 2000, notre campus abrite ainsi depuis peu une *Maison pour la science* (pour la Région Midi-Pyrénées) qui propose des formations aux enseignants afin de toucher un public plus jeune (de la maternelle à la classe de troisième). Car plus tôt les jeunes générations seront sensibilisées à la science et à la technologie, plus elles seront conscientes des enjeux des filières scientifiques et de l'avenir dont elles sont porteuses.

Au-delà de ces actions générales, nous devons aussi nous concentrer sur la place des femmes dans les filières scientifiques. Il

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014



LA RÉPARTITION, SELON LES PRINCIPALES FILIÈRES, des étudiants à l'université en 2011-2012, tous cursus confondus (licence, master, doctorat). Le graphique indiquant les proportions de femmes dans ces filières met en évidence des déséquilibres flagrants.

faut le répéter, l'égalité entre les femmes et les hommes est loin d'être acquise. Et il faut aussi regarder en face la réalité sociologique : on sait qu'il existe des écarts importants entre les sexes quand on examine les différentes filières, mais on n'a pas toujours conscience que la situation s'aggrave.

Alors que l'accès des femmes à l'enseignement supérieur progresse (elles sont même plus nombreuses que les hommes), les filières déséquilibrées – dans un sens ou dans l'autre – ont tendance à le devenir encore plus. Ainsi, entre 1998 et 2005, la proportion de femmes dans les filières scientifiques en France a baissé de 9 points pour atteindre 39,6 pour cent, avec des disparités très importantes suivant les filières. Par exemple, en informatique, génie électrique, mécanique, on compte moins de 20 pour cent de femmes. À l'inverse, en sciences de la vie, il y en a plus de 60 pour cent.

Dans la récente charte pour l'égalité active entre les femmes et les hommes dont vient de se doter l'Université Paul Sabatier, un important chapitre est consacré aux étudiantes (et aux étudiants). Parmi les mesures préconisées figure la production de données par sexe concernant l'inscription, les conditions d'études, la réussite, l'insertion professionnelle dans les différentes formations, pour nous aider à mieux cerner le problème. Mais figurent aussi des mesures d'encouragement, qui seront dans un premier temps des actions d'information destinées à favoriser l'orientation des étudiantes vers les disciplines où elles sont sous-représentées.

Dans ce domaine, que devons-nous faire de plus ? Avant tout, prendre collectivement conscience que c'est un problème grave et que nous ne pouvons rester passifs. Ensuite, multiplier les occasions de lutter contre les stéréotypes, responsables *in fine* des inégalités hommes-femmes et que l'on rencontre partout : au sein de la famille, à l'école, à l'université, au travail…

La vertu de l'exemple

Former des « ambassadrices » me paraît ainsi être une solution intéressante. Grâce à la *Maison pour la science*, pourquoi ne pas imaginer le lancement de « mini-conférences » qui seraient données dans les lycées, voire les collèges, par quelques-unes de nos chercheuses, doctorantes ou étudiantes ?

Car je crois à la vertu de l'exemple. À ce titre, la récente exposition financée par le ministère, *Infinités plurielles*, une galerie de portraits valorisant 60 scientifiques françaises, rencontre le succès partout où elle passe. Elle suscite peut-être déjà des vocations. Nous organisons également des journées *Filles et mathématiques* qui ciblent les collégiennes. Il faut passer de l'égalité formelle passive, où l'on se borne à affirmer que les filles ont autant que les garçons la possibilité d'accéder aux filières scientifiques, à l'égalité active, où l'on agit concrètement contre les inégalités de toutes sortes.

Il est loin le temps où Molière pouvait faire dire à l'un de ses personnages, dans *Les Femmes savantes* : « Il n'est pas bien honnête, et pour beaucoup de causes, Qu'une femme étudie et sache tant de choses. » Encore faut-il se donner les moyens de convaincre. Mais je crois au pointillisme en la matière : c'est la multiplication d'actions qui nous permettra d'atteindre notre but, car le public d'aujourd'hui, celui que nous devons toucher, à commencer par les jeunes filles, devient de plus en plus divers et difficile à capter. ■

Bertrand MONTHUBERT est professeur de mathématiques et président de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier.

Réagissez en direct à cet article sur www.pourlascience.fr

SciLogs

La science au quotidien

La nouvelle communauté de blogueurs scientifiques francophones

Grâce à ***Scilogs.fr***, dialoguez avec des chercheurs et acteurs du monde des sciences aux points de vue riches et variés. De blog en blog, explorez la science avec ceux qui la font, la décryptent, l'analysent : résultats de recherche, applications pratiques, perspectives insolites, débats éthiques et politiques… Pour vivre la science au quotidien !

Best of Bestioles
Loïc Mangin
Rédacteur en chef adjoint
Pour la Science

Ecoblog
Vincent Devictor
Chercheur au CNRS en écologie et biologie de la conservation

Signal sur bruit
Richard Taillet
Astrophysicien, professeur chercheur au LAPTh

Complexités
Jean-Paul Delahaye
Mathématicien, informaticien, et auteur de la rubrique *Logique et calcul* dans *Pour la Science*

Psycho Info
Jérôme Palazzolo
Médecin psychiatre, à Nice et à l'Université Internationale Senghor, à Alexandrie, en Égypte

L'actu sur le divan
Sébastien Bohler
Rédacteur à *Cerveau & Psycho*

Alterscience
Alexandre Moatti
Polytechnicien, chercheur en histoire des sciences au laboratoire SPHERE

Connectez-vous maintenant pour découvrir www.Scilogs.fr !

Suivez les dernières actualités des blogueurs également sur les réseaux sociaux

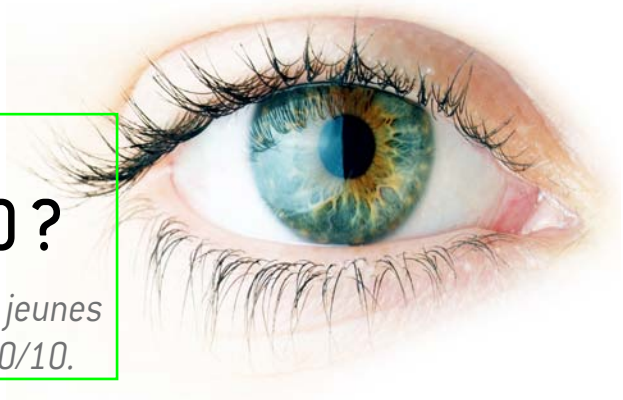
Suivez aussi **SciLogs** International | .com | .be | .es | .de
et partagez les points de vue de blogueurs scientifiques du monde entier

Proposé par POUR LA SCIENCE

VRAI OU FAUX

Peut-on avoir une acuité visuelle supérieure à 10/10 ?

Oui : 10/10 est une norme et non un maximum. Les jeunes atteignent souvent 16/10, et les rapaces plus de 30/10.



Laurent et Julia Laloum

Lors d'un examen de la vision, l'ophtalmologiste attribue une note d'acuité visuelle en dixièmes. Que signifie cette note ? La valeur de dix dixièmes est-elle un maximum, comme on pourrait le croire ?

L'acuité visuelle caractérise la capacité à distinguer un petit objet. En pratique, on utilise deux types de tests. Ceux du premier type évaluent la reconnaissance des formes, ceux du second quantifient le pouvoir séparateur de l'œil (la capacité à voir que deux points plus ou moins distants sont séparés).

Dans l'œil, les rayons lumineux issus d'un point extérieur sont focalisés par la cornée et le cristallin. Quand ce système optique est sans défaut, ils convergent sur la rétine, où se trouvent les cellules photoréceptrices. Pour que l'on distingue deux points lumineux, il faut que leurs images se forment sur deux photorécepteurs non contigus, c'est-à-dire séparés par au moins un photorécepteur non stimulé. Dans le cas contraire, on ne perçoit qu'une tache indifférenciée.

Dans le système de notation français, l'acuité visuelle est l'inverse de l'angle minimal formé avec l'œil par deux points séparables. Cet angle est mesuré en minutes d'arc (une minute est égale à un soixantième de degré). La notation en dixièmes est une convention, qui varie selon les pays. Une acuité de 1/1 (ou 10/10) correspond à la capacité de distinguer deux points séparés de une minute d'arc. Cette échelle n'est donc pas linéaire : il y a bien moins d'écart entre 10/10 et 9/10 (soit environ 1/1,11, c'est-à-dire que deux points doivent être séparés d'au moins 1,1 minute d'arc pour être distingués) qu'entre 1/10 (points séparés d'au moins 10 minutes d'arc) et 2/10 (soit 1/5, donc des points séparés d'au moins 5 minutes d'arc).

Une méthode pour diagnostiquer les maladies visuelles

L'acuité visuelle de 10/10, souvent comprise comme un maximum, est en fait juste une norme médicale : au-dessous, on considère qu'il y a un risque non négligeable pour que le sujet souffre d'une pathologie et qu'il faut la rechercher.

Les causes de mauvaise vision se comptent par centaines. Ce peut être juste une anomalie du système optique de l'œil, telle une myopie, corrigeable par des lunettes, ou une « vraie » maladie, qui peut toucher la rétine, le nerf optique, le cerveau... Dans ce dernier cas, la vision reste mauvaise quelles que soient les lunettes. Quand un sujet est myope, par exemple, son acuité visuelle doit être mesurée avec correction pour diagnostiquer s'il souffre en plus d'une telle pathologie.

Notons qu'une note supérieure ou égale à 10/10 ne signifie pas forcément une absence de maladie. En effet, les tests d'acuité ne concernent que le champ visuel central, car on oriente automatiquement son œil pour y placer ce qu'on veut voir. Cela permet de mieux distinguer les objets, l'acuité étant très faible dans le champ visuel périphérique : elle permet juste de compter le nombre de doigts à une distance de un mètre. Une différence notable entre un œil et un appareil photo est d'ailleurs que l'« acuité visuelle » de ce dernier reste souvent très bonne en périphérie.

Dès lors, les tests d'acuité ne détectent pas les maladies touchant les zones du système visuel responsables de la vision périphérique. Ainsi, un glaucome (une dégénérescence du nerf optique) ne perturbe la vision centrale qu'à un stade très avancé, où la cécité est proche. Avant ce stade, il est indétectable par les tests d'acuité.

Une acuité supérieure à 10/10 correspond donc simplement à une meilleure capacité à distinguer de petits objets que celle considérée comme la valeur standard d'un système visuel sain. Dans le test, les points peuvent être choisis aussi proches que l'on veut, et les distinguer correspondrait à une acuité visuelle de plus en plus grande. En pratique, il existe une limite physiologique liée à la taille et à la densité des photorécepteurs de l'œil. À partir de l'analyse de ces paramètres, on estime que de nombreux rapaces ont une acuité supérieure à 30/10. Chez l'homme, l'acuité visuelle des jeunes atteint souvent 12/10, et assez régulièrement 16/10. ■

Laurent LALOUM est neuro-ophtalmologiste et strabologue à Paris.
Julia LALOUM est ingénieure en électronique.
www.strabisme.fr

© vitoi costa/shutterstock.com

Les couleurs des exoplanètes

Frédéric Pont et Thomas Evans

La Terre est bleue, Mars est rouge… Et les planètes extrasolaires ? Isis est la première d'entre elles à avoir révélé sa couleur, livrant ainsi de précieux indices sur la composition de son atmosphère.

Le 20 décembre 2012, comme à chacune de ses révolutions, la planète Isis (surnom que nous avons donné à la planète HD 189733B) disparaît brièvement derrière son étoile, un soleil orange. Mais ce jour-là, elle le fait sous l'œil attentif du télescope spatial *Hubble*. Des astrophysiciens ont profité de cette éclipse pour déterminer la couleur de la planète : l'astre serait bleu profond, « bleu océan ». Cette teinte plus souvent associée à la Terre aurait une origine bien différente. Isis est une planète géante gazeuse, à l'image de Jupiter, et ne contient donc pas d'eau liquide. Et si l'or bleu n'est pas responsable de la couleur d'Isis, d'autres composés le sont. Une couche nuageuse à haute altitude composée de gouttes de verre serait la cause du bleu océan de cette planète. Plus généralement, les astrophysiciens espèrent exploiter la teinte des exoplanètes – les planètes situées hors du Système solaire – pour déterminer la composition de leur atmosphère et de leur surface.

Depuis une vingtaine d'années, grâce à différents télescopes, les chercheurs ont découvert plus de 1 000 exoplanètes ; et plus de 3 500 candidates sont en attente de confirmation. Ces corps sont nombreux dans la Voie lactée. Mais au-delà de leur simple recensement, les astrophysiciens veulent établir leurs caractéristiques (taille, densité, température, composition, climat) et comprendre leur formation. L'une des premières conclusions qu'il est possible de tirer de ces travaux est que les exoplanètes existent sous de nombreuses formes, dont certaines sont

1. CETTE EXOPLANÈTE BLEUE (vue d'artiste) pourrait ressembler à Isis, une géante gazeuse chaude dont la couleur est probablement due à des nuages de minuscules gouttes de verre.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

inconnues dans le Système solaire. Les chercheurs s'attendent à observer une grande variété de couleurs, reflet de cette diversité. Ainsi, certaines planètes seraient noires ou presque, d'autres mauves, d'autres encore bleues, etc. Or la couleur des exoplanètes commence à être accessible aux astrophysiciens, lesquels peuvent alors exploiter cette information pour mieux connaître ces corps célestes.

La couleur d'une exoplanète est une sorte d'empreinte digitale de l'atmosphère planétaire, puisqu'elle résulte de l'interaction de cette atmosphère avec la lumière de l'étoile. Comme nous l'expliquerons, la teinte d'une planète permet de déterminer la composition de son atmosphère et trahit la présence ou l'absence de nuages. Et les astrophysiciens espèrent améliorer les capacités de leurs instruments pour en tirer encore plus d'informations : détecter la présence d'une activité tectonique, d'eau liquide et même de vie, par exemple sous la forme d'une végétation capable de photosynthèse. Nous présenterons aussi les techniques mises en œuvre pour mesurer la couleur d'une exoplanète et les premiers résultats obtenus sur un type particulier de planètes, comparables à Isis. Nous évoquerons enfin les pistes de recherche pour les années à venir.

Le principe du lien entre la couleur d'une planète et sa composition n'est pas récent. Par une nuit dégagée, on peut facilement observer la couleur de Mars, la « planète rouge ». Les Grecs et les Romains ont associé cette couleur au feu et au sang, d'où l'attribution de la planète au dieu de la guerre. Nous savons aujourd'hui que cette couleur est due à la réflexion de la lumière solaire sur des roches « rouillées », riches en fer oxydé (Fe_2O_3), à la surface de Mars. Si le feu n'a rien à voir avec Mars, qui est une planète froide, le parallèle avec le sang est plus approprié : dans le sang oxygéné, l'hémoglobine qui contient du fer se transforme en oxyhémoglobine qui confère au sang sa couleur rouge intense .

De même, l'éclat blanc de Vénus, l'« étoile du Berger », juste après le coucher du Soleil, provient des épais nuages d'acide sulfurique qui la recouvrent entièrement. Ces nuages renvoient la lumière solaire, dans tout le spectre du domaine visible, vers l'espace.

Enfin, nous vivons sur la « planète bleue », un point bleu pâle sur la photographie prise en 1990 par la sonde *Voyager 1* depuis les confins du Système solaire, à une distance de 6,4 milliards de kilomètres. Ce bleu pâle de la Terre est dû à la combinaison de deux effets : le bleu profond des océans, qui absorbent plus efficacement les composantes verte et rouge de la lumière, et le blanc brillant des nuages, qui réfléchissent la lumière solaire blanche vers l'espace. L'analyse d'un spectre électromagnétique détaillé de la Terre révèle aussi la présence d'ozone, d'oxygène, de vapeur d'eau et de végétation.

De telles analyses s'appliquent à toutes les planètes et satellites du Système solaire, car il est possible de les observer directement et d'en mesurer le spectre. Ce n'est hélas pas le cas des exoplanètes. En effet, celles-ci sont pour la plupart très proches de leur étoile. La lumière réfléchie par la planète est alors noyée dans l'éclat intense de l'étoile. Cependant, les chercheurs ont développé des techniques pour observer de façon indirecte les exoplanètes et déterminer leur couleur.

L'exoplanète Isis est bien connue des spécialistes, et les observations que nous avons effectuées s'inscrivent dans une longue série qui a commencé en 2005 avec la découverte de cette planète, à l'Observatoire de Haute-Provence. Les mesures permettent d'en dresser un portrait de plus en plus détaillé. Lors de l'éclipse de l'exoplanète observée par *Hubble* en 2012, nous avons utilisé le spectrographe STIS, l'un des instruments embarqués, pour analyser le spectre d'émission lumineuse du système stellaire (étoile-planète). Le télescope spatial a fixé l'étoile pendant six heures, tandis que la planète s'éclipsait derrière elle et réémergeait de l'autre côté. La période orbitale d'Isis, son « année », est de deux jours et cinq heures seulement, et son éclipse dure une heure et demie.

Notre équipe a observé une variation faible, mais mesurable, de l'intensité lumineuse durant l'éclipse. En effet, la lumière émise par le système stellaire est dominée par le rayonnement de l'étoile, mais une petite partie provient de la planète qui réfléchit celle reçue de son soleil. Durant l'éclipse, cette contribution disparaît, d'où la baisse de luminosité mesurée. Mais la diminution n'est pas la même pour toutes les longueurs d'onde : alors que la luminosité du système ne change pratiquement pas dans le vert et le rouge, un déficit dans le bleu a été constaté. Cela signifie que la planète émet principalement de la lumière bleue, ce qui correspond à sa couleur.

Nos mesures récentes avec le télescope *Hubble* suggèrent que la couleur d'Isis est similaire à celle des océans profonds sur Terre. La similarité s'arrête là : la présence d'eau liquide à la surface d'Isis est exclue. Il s'agit d'une planète géante gazeuse, dont l'atmosphère

L'ESSENTIEL

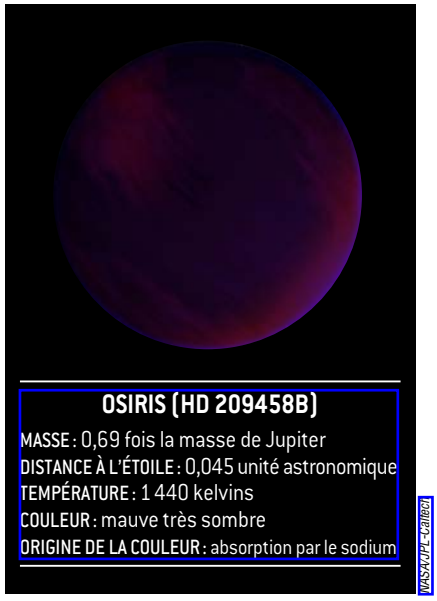
- Les télescopes spatiaux permettent de mesurer la couleur d'une exoplanète par des méthodes indirectes.
- Cette couleur fournit des renseignements sur la composition de l'atmosphère de la planète.
- Les planètes gazeuses de type jupiter chaud sont les plus simples à étudier, en raison de la proximité de leur étoile.
- Les astrophysiciens ont montré que la planète Isis est bleue, et que cela est dû à la présence de nuages de gouttelettes de verre dans son atmosphère.

© ESO/L. Calçada, Dibouman, Satory/V consortium

ISIS (HD 189733B)

MASSE : 1,16 fois la masse de Jupiter
DISTANCE À L'ÉTOILE : 0,031 unité astronomique
TEMPÉRATURE : 1 190 kelvins
COULEUR : bleue
ORIGINE DE LA COULEUR : diffusion Rayleigh

NASA, ESA, M. Kornmesser



OSIRIS (HD 209458B)

MASSE : 0,69 fois la masse de Jupiter
DISTANCE À L'ÉTOILE : 0,045 unité astronomique
TEMPÉRATURE : 1 440 kelvins
COULEUR : mauve très sombre
ORIGINE DE LA COULEUR : absorption par le sodium

NASA/JPL-Caltech

TRES-2B

MASSE : 1,2 fois la masse de Jupiter
DISTANCE À L'ÉTOILE : 0,035 unité astronomique
TEMPÉRATURE : 1 500 kelvins
COULEUR : noire (albédo inférieur à 1 %)
ORIGINE DE LA COULEUR : inexpliquée

David A. Aguilar (CfA)

est composée surtout d'hydrogène, comme Jupiter. Mais Isis est en orbite autour de son étoile à une distance presque 100 fois plus courte, ce qui porte son atmosphère à près de 1 000 °C. À cette température, l'eau n'existerait dans l'atmosphère que sous forme de vapeur transparente, tout comme les autres molécules telles que le méthane, l'ammoniac ou l'acide sulfurique, qui composent les nuages des planètes du Système solaire.

Nous pensons que la couleur d'Isis s'explique par l'effet de deux composantes de son atmosphère, les vapeurs de sodium et un brouillard de silicates.

Des planètes sombres et mauves

Le sodium est le sixième élément le plus répandu sur Terre : il représente 2,6 pour cent de la croûte terrestre sous différentes formes, dont le sel de mer (le chlorure de sodium, NaCl). Dans la fournaise de l'atmosphère d'Isis, le sodium est à l'état gazeux. C'est le seul élément, dans les atmosphères planétaires, capable d'absorber la lumière visible (la plupart des autres atomes absorbent plutôt dans l'ultraviolet). En fait, dès les premières études sur l'atmosphère des jupiters chauds – le nom donné aux planètes géantes gazeuses chaudes –, les modèles théoriques prévoyaient que ces planètes seraient très sombres dans le visible, car elles absorberaient, à cause du sodium, plus de 90 pour cent de la lumière stellaire incidente. Cet élément absorbe, en conditions de laboratoire, dans l'orange (à deux longueurs d'onde bien définies). Mais, sur un jupiter chaud, la pression, *via* les collisions et interactions des molécules, élargit les pics d'absorption, qui recouvrent alors une grande partie du spectre visible *(voir l'encadré page 26)*. Ces planètes sont donc sombres avec une teinte mauve.

Le télescope spatial américain *Kepler*, conçu pour rechercher des exoplanètes et en particulier des planètes du type de la Terre, a mesuré la lumière réfléchie d'une dizaine de jupiters chauds, et montré que ces planètes absorbent beaucoup plus de lumière qu'elles n'en réfléchissent. Ces observations confirment l'hypothèse des jupiters chauds sombres, probablement à cause du sodium. Cependant, la caméra de *Kepler* ne distingue pas les longueurs d'onde, et ne peut donc pas déterminer les couleurs et ainsi confirmer la teinte mauve de ces planètes géantes gazeuses chaudes. Un cas remarquable de jupiter chaud est l'exoplanète TrES-2b, qui renvoie moins de un pour cent de la lumière de son soleil ; cela la rend beaucoup plus sombre qu'aucune autre planète connue et même que les pigments les plus noirs utilisés en peinture. Le sodium seul ne permettant pas d'obtenir une planète aussi sombre, d'autres facteurs interviennent sans doute, mais on ignore lesquels.

Encore à partir des observations de *Kepler*, les astrophysiciens ont aussi trouvé une exception à la règle des jupiters chauds sombres. Kepler-7b est plutôt brillant avec un facteur de réflexion, ou albédo, d'environ 35 pour cent. Cette anomalie est

LES AUTEURS

Frédéric PONT est professeur de sciences planétaires à l'Université d'Exeter, au Royaume-Uni.

Thomas EVANS est doctorant à l'Université d'Oxford, au Royaume-Uni.

BIBLIOGRAPHIE

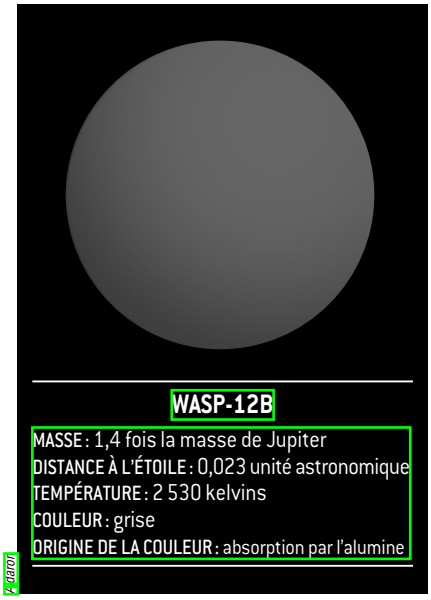
F. Pont, **Alien skies - planetary atmospheres from Earth to exoplanets**, Springer, 2014.

T. Evans *et al.*, **The deep blue color of HD 189733b : albedo measurements with *Hubble* space Telescope**, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 772, L16, 2013.

K. Heng, **Le climat des exoplanètes**, *Pour la Science*, n° 421, novembre 2012.

F. Pont *et al.*, **Detection of atmospheric haze on an extrasolar planet**, *MNRAS*, vol. 385, pp. 109-118, 2008.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014



WASP-12B

MASSE : 1,4 fois la masse de Jupiter
DISTANCE À L'ÉTOILE : 0,023 unité astronomique
TEMPÉRATURE : 2 530 kelvins
COULEUR : grise
ORIGINE DE LA COULEUR : absorption par l'alumine

D. Baron

attribuée à des nuages, mais leur nature est encore inconnue.

Le prototype des jupiters chauds est la planète Osiris, découverte en 1999 et abondamment observée depuis. Le rayon de son orbite est de sept millions de kilomètres, l'équivalent du septième de la distance entre Mercure et le Soleil. Sa révolution dure 3,5 jours, et sa température de surface est d'environ 1 440 kelvins (1 167 °C).

Des vapeurs de sodium sur Osiris et sur Isis

La signature spectrale du sodium dans l'atmosphère de cette planète a été détectée en 2002 avec le télescope *Hubble* (il s'agissait alors de la première observation de l'atmosphère d'une exoplanète). Le satellite canadien MOST a ensuite mesuré que la planète renvoyait moins de neuf pour cent de la lumière incidente. Ces deux éléments semblent confirmer qu'Osiris est une planète « mauve très sombre ».

Pourquoi détectons-nous alors du bleu vif pour Isis ? Comme pour Kepler-7b, la réponse est, selon nous, liée à la présence de nuages ou de brouillards. L'idée est que des nuages, présents dans la haute atmosphère, renvoient la composante bleue de la lumière de l'étoile, avant qu'elle ne pénètre dans la couche riche en sodium. Si les nuages sont composés de particules très fines, ils vont réfléchir très efficacement la lumière bleue, par le phénomène de « diffusion Rayleigh », qui est aussi à l'origine de la couleur bleue du ciel de la Terre *(voir l'encadré page 26)*.

En quoi consiste la diffusion Rayleigh ? Lorsqu'on a des molécules ou des particules de taille inférieure à la longueur d'onde de la lumière incidente, la probabilité de diffusion dépend de la longueur d'onde : elle est inversement proportionnelle à la puissance 4 de la longueur d'onde. Ainsi, la lumière bleue (longueur d'onde d'environ 400 nanomètres) est environ 16 fois plus diffusée que la lumière rouge (environ 800 nanomètres).

Sur Terre, la diffusion des rayons solaires par les molécules d'azote et d'oxygène est ainsi responsable du bleu du ciel (le bleu de ces rayons se diffusant dans l'atmosphère). Lors d'un coucher de soleil, les rayons traversent une épaisseur d'atmosphère plus importante ; le bleu de ces rayons est alors diffusé, ce qui laisse une teinte à dominante rouge.

Dans l'atmosphère d'un jupiter chaud, les nuages en mesure de se former sont très différents de ceux des planètes du Système solaire. En raison de la haute température, ils sont composés de gouttes ou billes microscopiques de matériaux très résistants à la chaleur. La liste des composés susceptibles de former des nuages dans des atmosphères très chaudes inclut les silicates (oxydes de silicium, la composante principale des roches sur notre planète), le fer, l'oxyde d'aluminium et l'oxyde de titane. Ces composés sont solides dans la croûte terrestre ; selon leur structure cristalline, ils forment du verre, du quartz, du saphir ou du rubis. Dans l'atmosphère d'un jupiter chaud, ces composés peuvent s'évaporer et se recondenser, probablement sous forme de globules liquides ou solides amorphes que l'on pourrait décrire comme des « gouttes de lave » ou une « pluie de verre ».

Avant de mesurer en 2012 la couleur d'Isis, nous avions déjà des indices de la présence de telles particules de verre dans l'atmosphère de cette planète. En 2007, avec le télescope *Hubble*, nous avions observé le passage de la planète devant son étoile – un « transit ». Or il existe une technique permettant de mesurer le spectre de la lumière de l'étoile filtrée par l'atmosphère de la planète *(voir l'encadré page 25)*. Nous avons ainsi détecté la signature caractéristique de la diffusion Rayleigh, comme pour un coucher de soleil sur Terre. Nous pouvions donc conclure qu'il existe sur Isis des molécules ou de petites particules capables de diffuser la lumière.

D'après nos mesures de température, l'hypothèse la plus naturelle est la présence sur Isis d'un brouillard de petites particules (moins de 100 nanomètres de diamètre) constituées principalement de silicates sous forme de verre.

Cette observation ne permettait cependant pas de déterminer la couleur d'Isis. Les deux mesures portant sur l'émission lumineuse de l'atmosphère de cette planète, durant le transit et pendant l'éclipse, ont permis d'établir la présence d'un brouillard de particules de silicates, une « pluie de verre », dans la haute atmosphère.

Un brouillard de silicates sur Isis

Ce brouillard se formerait du côté sombre de la planète, c'est-à-dire la face qui n'est pas exposée et chauffée par l'étoile. Cet hémisphère serait toujours le même, en raison du phénomène de rotation synchrone : les forces de marée exercées par l'étoile finissent par faire coïncider les périodes orbitales annuelle et journalière (de la même façon que la Lune présente toujours le même côté à la Terre). La différence de température entre l'hémisphère éclairé et celui qui reste dans l'ombre est alors élevée : plusieurs centaines de degrés. Il en résulte des courants atmosphériques puissants – les modèles suggèrent que l'atmosphère d'Isis est le siège de vents soufflant à plus de 7 000 kilomètres par heure. Ces courants redistribuent la chaleur de la face éclairée vers l'autre côté et, par la même occasion, dispersent le brouillard de verre sur l'ensemble de la planète, d'où sa couleur bleu profond.

Isis est à ce jour la seule planète dont on a déterminé la couleur dans le visible. À la suite d'une grande campagne d'observations avec *Hubble*, dirigée par David Sing de l'Université d'Exeter, nous avons mesuré le « spectre du soleil couchant » pour dix jupiters chauds. Cela nous a permis d'avancer quelques hypothèses sur la diversité des atmosphères de ces planètes.

Il semble que le mauve sombre d'Osiris et le bleu profond d'Isis définissent les deux classes principales de jupiters chauds où règnent des températures d'environ 1 000 °C. La différence est liée à la présence ou l'absence d'un brouillard de silicates.

D'autres jupiters chauds ont des températures plus élevées, 2 000 °C et plus. À ces températures, les particules de silicate se vaporisent et le gaz résultant est transparent

dans le visible. Mais dans ces conditions, les modèles prévoient que les planètes sont sombres et grises, en raison de l'importante absorption de la lumière visible par les vapeurs d'oxyde de titane (qui précipitent en grains solides à température plus faible, d'où leur absence dans la haute atmosphère d'Isis et d'Osiris par exemple).

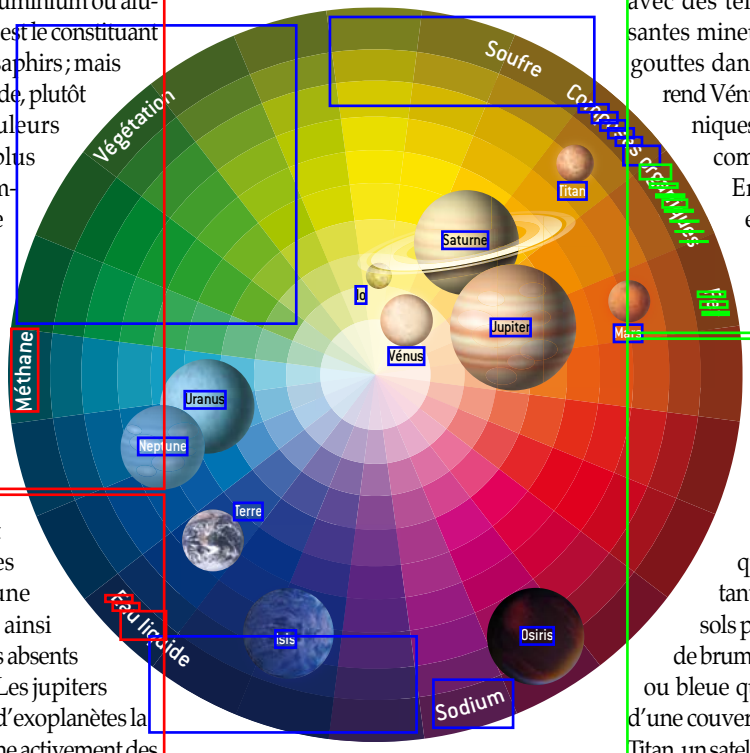
Nous n'avons observé aucune trace d'oxyde de titane dans les spectres des planètes de notre échantillon. Mais nous mesurons l'effet de nuages, dont la signature spectrale pourrait s'expliquer par un autre composé qui résiste bien aux hautes températures, l'oxyde d'aluminium ou alumine (Al_2O_3). Ce composé est le constituant principal des rubis et des saphirs ; mais dans une atmosphère chaude, plutôt que des cristaux aux couleurs pures, on s'attend à de plus prosaïques globules ressemblant à des microbilles de verre sale. À ce stade de nos observations, toutes ces hypothèses restent préliminaires et pourraient être modifiées à la lumière de nouvelles observations et de nouveaux modèles.

Deux décennies de découvertes nous ont appris que les exoplanètes sont nombreuses, et d'une grande diversité. Il existe ainsi plusieurs types de planètes absents de notre Système solaire. Les jupiters chauds forment la famille d'exoplanètes la plus connue, mais on cherche activement des superterres (des planètes telluriques plus grandes que la Terre). Quelques planètes cinq à dix fois plus massives que la Terre en sont peut-être, mais la composition de leur atmosphère et de leur surface reste à déterminer. Des arguments théoriques suggèrent qu'il existe aussi des planètes océan (recouvertes d'eau), ou des planètes de lave (planètes rocheuses trop chaudes pour que le magma se solidifie).

Le travail minutieux de caractérisation de chacune des exoplanètes découvertes prend du temps. L'une des conclusions les plus remarquables de la moisson d'observations de ces dernières années est que toutes les combinaisons plausibles de tailles et d'orbites de planètes semblent réalisées à travers la galaxie. Pour les planétologues, qui, pendant longtemps, ont dû se contenter des planètes du Système solaire, les mondes extrasolaires constituent un immense continent à explorer.

Les jupiters chauds sont les planètes les plus connues et les mieux étudiées, car ce sont les plus faciles à observer. Les méthodes de détection par transit et par mesure de la vitesse radiale favorisent en effet la découverte de planètes massives, de grande taille et proches de leur étoile.

Dans la méthode du transit, les astrophysiciens recherchent une baisse périodique de la luminosité d'une étoile, qui correspond au passage régulier de la planète devant l'étoile. La méthode de la vitesse radiale consiste à détecter un léger déplacement de l'étoile sous l'effet de la force gravitationnelle liant le soleil et la planète. Ces méthodes de détection favorisent les jupiters chauds et, dans une moindre mesure, les superterres. Mais les astrophysiciens gardent comme objectif plus lointain de découvrir des planètes comparables à la Terre en taille et en composition. Ils ne disposent encore d'aucune observation pertinente de ce type. Les planétologues ont néanmoins imaginé les conditions atmosphériques de ces hypothétiques exoplanètes à partir de modèles théoriques et des enseignements tirés du Système solaire.



2. CETTE PALETTE DE COULEURS illustre la variété des couleurs que revêtent les planètes, en fonction de leur composition et des conditions atmosphériques.

Traquer des superterres et des exoterres

Il est probable que les nuages soient le facteur déterminant dans la couleur des exoterres, des planètes similaires en taille à la Terre. En simplifiant, ces astres dotés de nuages seront brillants et plutôt blancs, avec des teintes dépendant de composantes mineures qui peuvent colorer les gouttes dans les nuages : ainsi, le soufre rend Vénus jaunâtre, les molécules organiques teintent en rouge les nuages, comme sur Jupiter par exemple. En l'absence de nuages, une exoterre serait plus sombre à cause des roches volcaniques, des océans ou d'une éventuelle végétation.

Mais il n'est pas garanti que les couleurs de la surface ou des océans d'une exoterre soient aussi clairement visibles de l'espace que pour la Terre. L'atmosphère sera d'autant moins transparente que son épaisseur sera importante. En outre, la présence d'aérosols pourrait recouvrir une exoterre de brume et lui donner une teinte jaune ou bleue qui serait difficile à distinguer d'une couverture nuageuse. C'est ainsi que Titan, un satellite de Saturne, apparaît comme une boule orangée à cause du brouillard d'hydrocarbures qui voile son atmosphère.

Certains spécialistes pensent d'ailleurs que la transparence actuelle de notre atmosphère est liée à la présence abondante d'oxygène. Cet élément oxyderait et détruirait les aérosols, nettoyant ainsi l'atmosphère. Comme l'oxygène est associé à la photosynthèse et est une composante récente (à l'échelle de l'âge du Système solaire) de l'atmosphère terrestre, il est possible que la planète n'ait pas été bleue dans le passé, mais peut-être jaune, malgré la présence d'océans étendus.

Par ailleurs, sur Terre, la présence de plantes réalisant la photosynthèse influe sur la couleur globale de la planète. L'abondance des végétaux sur les continents donne à notre planète une petite

© Antun Hirsman/shutterstock.com

touche de vert. L'effet le plus détectable sur le spectre global est l'atténuation de la lumière rouge, absorbée par les molécules de chlorophylle.

Certains chercheurs ont suggéré de détecter la présence de vie sur une éventuelle exoterre par l'effet de la végétation sur le spectre lumineux. Toutefois, cette empreinte est minime même pour la Terre. De plus, rien ne garantit que la photosynthèse opérée par les plantes terrestres soit universelle. Par exemple, la nature de l'étoile pourrait influer sur la partie du spectre la plus intéressante à exploiter par les organismes vivants. Et, même sur Terre, certains micro-organismes ont développé des métabolismes qui ne font pas appel au rayonnement solaire.

La présence de glace pourrait aussi déterminer en partie l'aspect des exoterres. On sait aujourd'hui que la Terre elle-même a passé de longues périodes dans un état de glaciation globale (des époques nommées « Terre boule de neige »). Notre planète aurait été beaucoup plus blanche et claire (ce n'est cependant pas une certitude, car la glace et la neige peuvent être salies par des poussières volcaniques, comme la surface des lunes glacées Europe et Ganymède).

Pour étudier les couleurs d'une exoterre, une approche différente de celles que nous avons mentionnées serait de mesurer les changements de luminosité et de couleur pendant que la planète tourne sur elle-même. On pourrait ainsi reconstruire grossièrement la carte des couleurs de la planète en fonction de la longitude.

En 2009, une équipe d'astrophysiciens américains a utilisé la sonde spatiale EPOXI *(Extrasolar Planet Observation and Deep Impact Extended Investigation)* pour mesurer la couleur de la Terre depuis un point très éloigné. La planète apparaît comme un simple

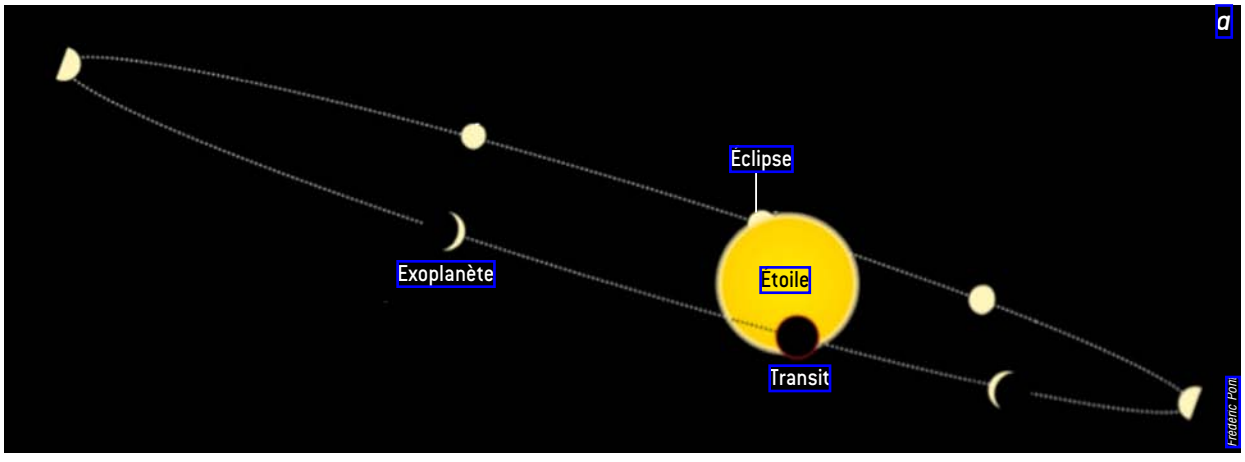
COMMENT OBSERVER LA COULEUR DES EXOPLANÈTES ?

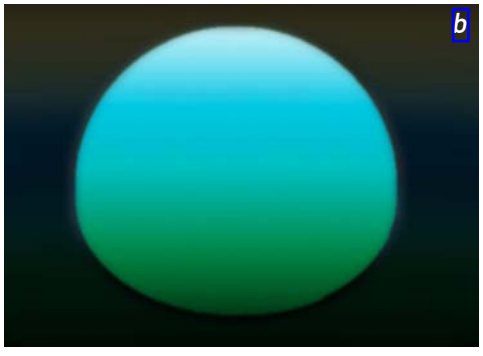
L'étude de la planète Isis illustre parfaitement les techniques mises en œuvre pour déterminer la couleur d'une exoplanète et la composition de son atmosphère.

En 2007, des premiers indices sur son atmosphère ont été obtenus pendant le transit de la planète devant son étoile. Cinq ans plus tard, la couleur a été déterminée à l'occasion de l'éclipse de la planète, lors de son passage derrière l'étoile *(a)*. La planète est en orbite autour de son étoile dans un plan que l'on voit de la Terre presque sur la tranche. Ainsi, lors d'un transit, la planète passe devant son étoile et bloque une partie de sa lumière. La détection des transits est une des techniques utilisées par les astrophysiciens pour découvrir les exoplanètes. Une baisse faible, mais périodique, de l'intensité lumineuse de l'étoile indique le passage d'une planète en orbite.

Lors du transit, une petite fraction de la lumière de l'étoile traverse l'atmosphère de la planète. Le spectre de ces rayons lumineux est alors modifié, de la même façon que sur Terre la lumière solaire devient rouge lors d'un coucher de soleil, par diffusion Rayleigh de la lumière par les molécules atmosphériques. Les chercheurs ont ainsi déduit que la diffusion Rayleigh était à l'œuvre dans l'atmosphère d'Isis. Cela livre des indices sur la composition atmosphérique. Cette technique a été utilisée sur d'autres jupiters chauds, tels Osiris et WASP-12b, dont les couchers de « soleil » sont simulés sur les figures *b* et *c*.

Lors d'une éclipse, la lumière réfléchie par la planète est occultée. Ainsi, en comparant le spectre de l'étoile avec ou sans la composante réfléchie par la planète, on peut déduire quelles longueurs d'onde émergent de la planète, ce qui correspond à sa couleur. Les mesures sont difficiles, car la lumière réfléchie par la planète correspond à environ 1/10 000e de la luminosité totale.





LORS DU PASSAGE de la planète devant son étoile, pendant un transit *(a)*, la lumière stellaire est plus ou moins diffusée selon la longueur d'onde et l'épaisseur d'atmosphère traversée. On observe un « coucher de soleil ». Le phénomène a été simulé pour plusieurs jupiters chauds, ici pour Osiris *(b)* et WASP-12b *(c)*.

Les principaux processus qui déterminent la couleur d'une exoplanète

1. La diffusion Rayleigh

Ce phénomène explique la couleur bleue du ciel terrestre. Les molécules de gaz sont de taille inférieure aux longueurs d'onde de la lumière visible et diffusent ce rayonnement, en raison des interactions du champ électromagnétique de la lumière avec les nuages électroniques des molécules. La probabilité de diffusion est inversement proportionnelle à la puissance 4 de la longueur d'onde. Ainsi, la composante bleue de la lumière est 16 fois plus diffusée que la partie rouge. Sur les jupiters chauds, des brouillards de silicates (des billes de 100 nanomètres de diamètre) produisent une diffusion Rayleigh et donnent une teinte bleue à la planète.

2. La diffusion de Mie

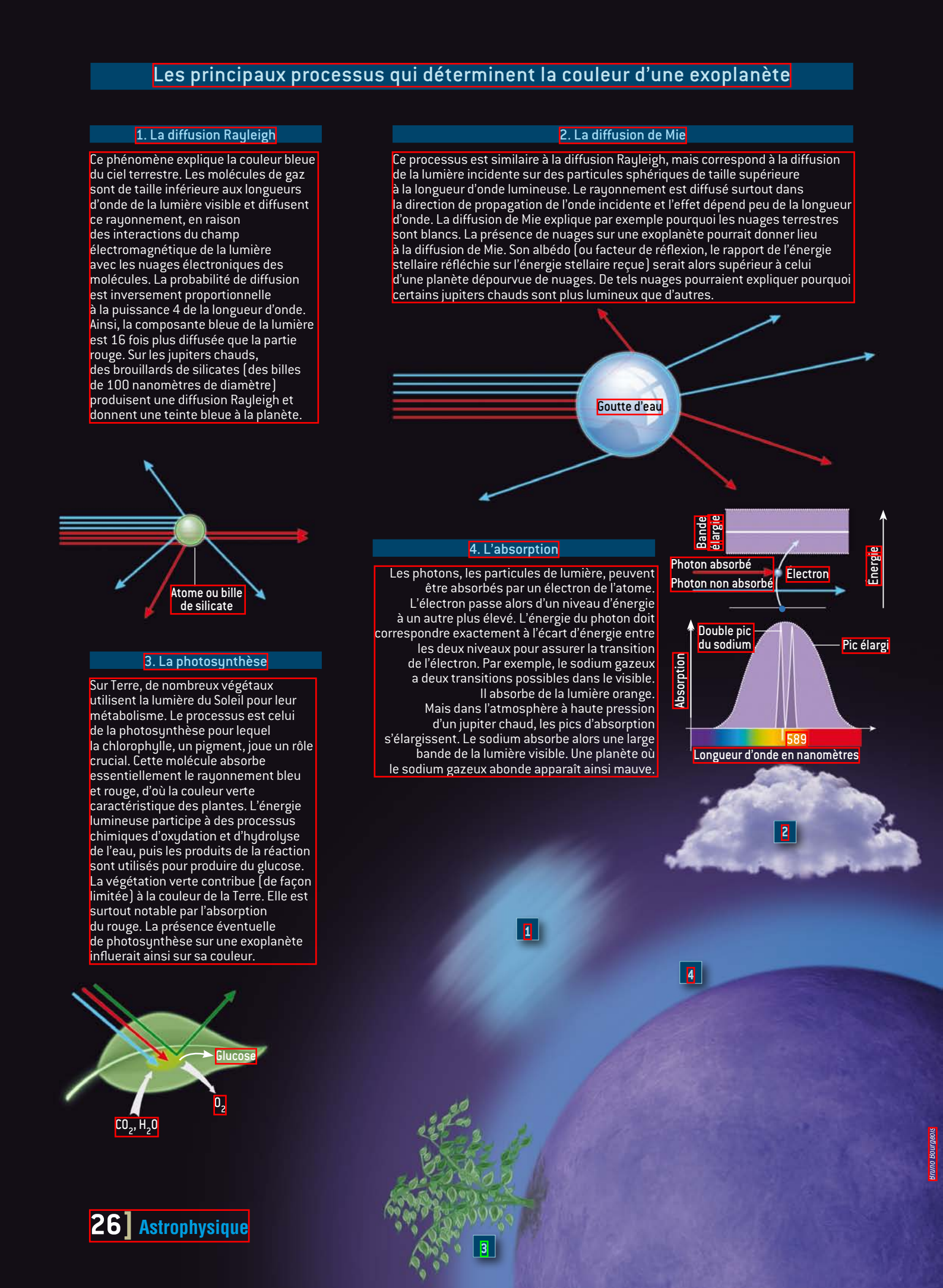
Ce processus est similaire à la diffusion Rayleigh, mais correspond à la diffusion de la lumière incidente sur des particules sphériques de taille supérieure à la longueur d'onde lumineuse. Le rayonnement est diffusé surtout dans la direction de propagation de l'onde incidente et l'effet dépend peu de la longueur d'onde. La diffusion de Mie explique par exemple pourquoi les nuages terrestres sont blancs. La présence de nuages sur une exoplanète pourrait donner lieu à la diffusion de Mie. Son albédo (ou facteur de réflexion, le rapport de l'énergie stellaire réfléchie sur l'énergie stellaire reçue) serait alors supérieur à celui d'une planète dépourvue de nuages. De tels nuages pourraient expliquer pourquoi certains jupiters chauds sont plus lumineux que d'autres.

3. La photosynthèse

Sur Terre, de nombreux végétaux utilisent la lumière du Soleil pour leur métabolisme. Le processus est celui de la photosynthèse pour lequel la chlorophylle, un pigment, joue un rôle crucial. Cette molécule absorbe essentiellement le rayonnement bleu et rouge, d'où la couleur verte caractéristique des plantes. L'énergie lumineuse participe à des processus chimiques d'oxydation et d'hydrolyse de l'eau, puis les produits de la réaction sont utilisés pour produire du glucose. La végétation verte contribue (de façon limitée) à la couleur de la Terre. Elle est surtout notable par l'absorption du rouge. La présence éventuelle de photosynthèse sur une exoplanète influerait ainsi sur sa couleur.

4. L'absorption

Les photons, les particules de lumière, peuvent être absorbés par un électron de l'atome. L'électron passe alors d'un niveau d'énergie à un autre plus élevé. L'énergie du photon doit correspondre exactement à l'écart d'énergie entre les deux niveaux pour assurer la transition de l'électron. Par exemple, le sodium gazeux a deux transitions possibles dans le visible. Il absorbe de la lumière orange. Mais dans l'atmosphère à haute pression d'un jupiter chaud, les pics d'absorption s'élargissent. Le sodium absorbe alors une large bande de la lumière visible. Une planète où le sodium gazeux abonde apparaît ainsi mauve.



Bruno Bourgeois

point dans l'espace, et on se retrouve dans une situation similaire à l'observation des exoplanètes. Or les mesures de luminosité d'EPOXI permettent de reconstruire dans les grandes lignes la distribution des océans et des continents sur Terre en fonction de la longitude, ainsi que l'évolution de la couverture nuageuse globale.

Cette expérience pourrait être appliquée aux exoterres. Les chercheurs mesureraient la distribution globale et longitudinale des océans, des continents et de la couverture nuageuse, simplement à partir des variations de couleur accumulées au fil du temps. Dans le Système solaire, la Terre est unique non seulement par sa couleur bleue, mais aussi par les fortes variations de ses couleurs, entre les différentes parties du globe et en fonction des mouvements rapides des nuages. Toutes les autres planètes ont une couverture homogène, à l'instar de Vénus et Neptune, ou la répartition des couleurs est stable, comme sur Mars et Jupiter.

Les deux facteurs d'évolution des couleurs (les variations en longitude et les changements rapides au cours du temps) sont des indicateurs intéressants pour la recherche de vie à la surface d'une planète. Les variations en longitude pourraient révéler une alternance d'océans et de continents, donc le signe d'une activité tectonique, qui participe au cycle du carbone avec des échanges entre le dioxyde de carbone atmosphérique et les roches riches en carbonates. Certains chercheurs avancent qu'un tel cycle peut participer au développement de la vie, mais cela reste très débattu. Enfin, la variation rapide des couleurs signe la présence de nuages et du cycle potentiel de l'eau avec la présence d'eau liquide, essentielle à la vie telle que nous la connaissons.

Observer une exoterre ?

Mesurer les couleurs d'une exoterre avec la méthode des éclipses et des transits sera très ardu. Une planète de cette taille est bien plus petite qu'un jupiter chaud (elle projette un disque 100 fois plus petit), et ces méthodes atteignent alors leur limite. À cette échelle de précision, les étoiles varient constamment en couleur et en intensité, de par l'activité magnétique sur leur surface bouillonnante. Ce signal complexe risque de cacher la contribution d'une planète de petite taille.

L'autre option est de tenter d'observer la planète directement. Une exoterre sera plus distante de son soleil qu'un jupiter chaud, mais le problème subsiste, comment distinguer... le ver luisant à côté du phare ? Ces dernières années pourtant, les techniques nécessaires à ce type d'observations ont connu de nets progrès. Plusieurs planètes géantes ont été observées directement, mais seulement dans l'infrarouge. Seule l'émission thermique de la planète est observée, et pas du tout la lumière réfléchie. Ainsi, on est encore loin de pouvoir mesurer de cette façon la couleur d'une exoterre, mais, en théorie, l'approche est prometteuse.

La mesure de la couleur de la planète Isis nous permet de mieux comprendre les jupiters chauds, ce qui aide à nous les représenter et à nous les rendre plus proches. Ce résultat constitue un pas de plus vers l'objectif captivant qu'est l'exploration des atmosphères d'exoplanètes de divers types – l'exploration de nouveaux mondes, dont certains abritent peut-être la vie. ■

La reconnaissance visuelle chez les insectes

Elizabeth Tibbetts et Adrian Dyer

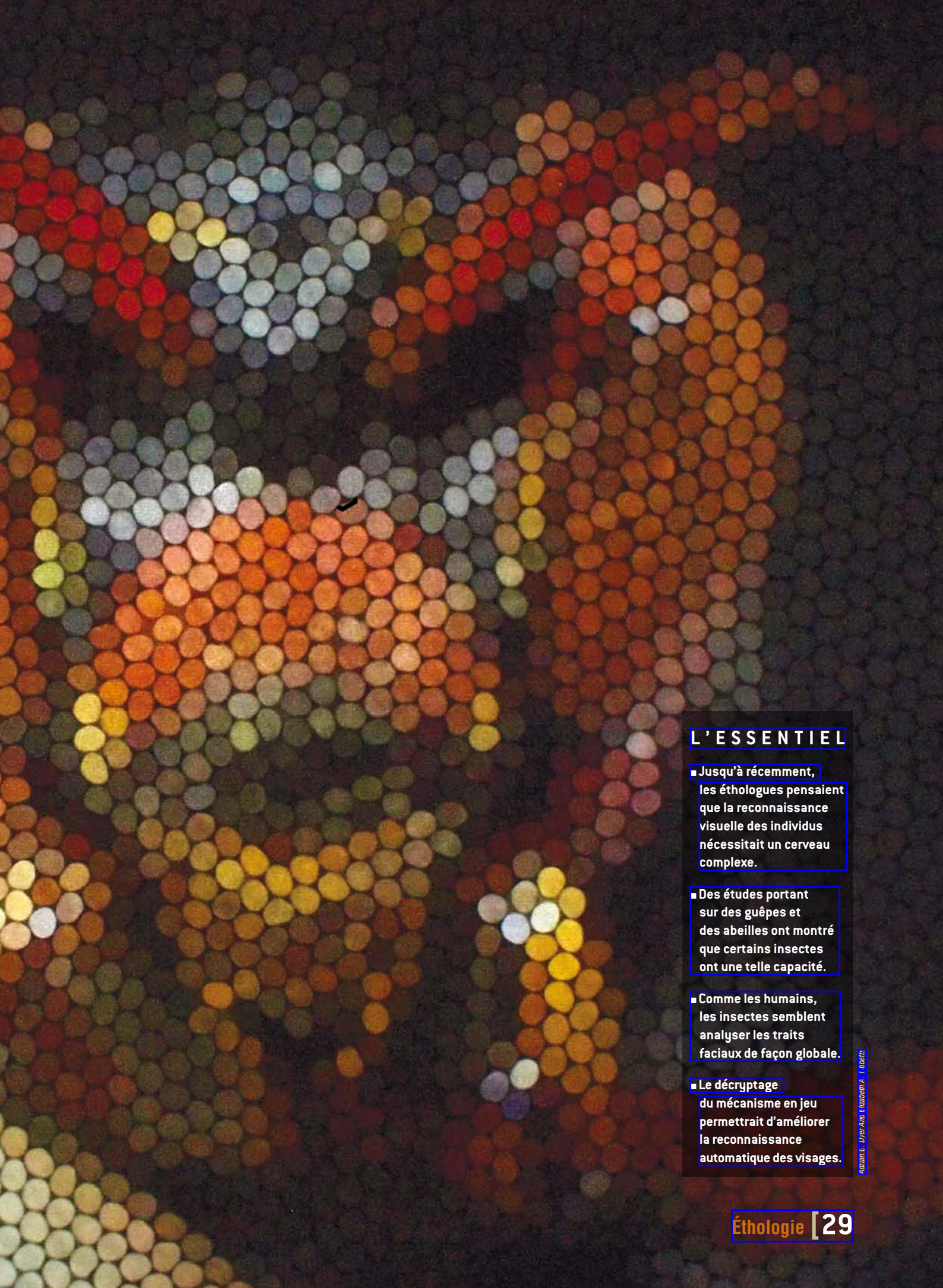
Reconnaître les traits faciaux de ses congénères ne requiert pas un cerveau complexe. Certains insectes sont étonnamment doués pour cette tâche.

L'intelligence des guêpes et des abeilles paraît sans commune mesure avec celle des hommes. Elles construisent des nids, fouillent les environs à la recherche de nectar, élèvent leur progéniture, puis meurent, leur vie ne durant en général qu'une année tout au plus. Toutefois, certaines de ces espèces présentent au moins une capacité cognitive rivalisant avec celle des hommes et d'autres primates : elles reconnaissent la tête de leurs congénères.

Les membres d'une espèce de guêpes sont capables de percevoir et de mémoriser les marques spécifiques de la tête d'une congénère et d'utiliser ces informations pour distinguer les individus lors d'interactions ultérieures, tout comme les êtres humains naviguent dans leur environnement social en apprenant à reconnaître les visages de leurs proches, amis et collègues. De plus, certains insectes, qui d'ordinaire ne mémorisent pas visuellement leurs congénères dans la nature, peuvent être entraînés à le faire, et parfois même apprendre à distinguer des visages humains.

On entend souvent dire que c'est la croissance du cerveau au fil de l'évolution qui a permis aux individus des sociétés complexes d'acquérir la capacité d'apprentissage et de mémorisation. Dès lors, comment est-il possible que des animaux dotés d'un cerveau un million de fois moins volumineux que le nôtre aient aussi

1. UNE TÊTE DE GUÊPE, telle que pourrait la voir une autre guêpe, dont les yeux sont composés de nombreux éléments indépendants.



L'ESSENTIEL

- Jusqu'à récemment, les éthologues pensaient que la reconnaissance visuelle des individus nécessitait un cerveau complexe.
- Des études portant sur des guêpes et des abeilles ont montré que certains insectes ont une telle capacité.
- Comme les humains, les insectes semblent analyser les traits faciaux de façon globale.
- Le décryptage du mécanisme en jeu permettrait d'améliorer la reconnaissance automatique des visages.

Adrian G. Dyer, Ana Elizabeth A. I. Doerts

cette capacité ? Cette constatation a conduit les éthologues à examiner comment cette faculté a évolué et quelles caractéristiques l'ont rendue possible. Le comprendre pourrait aider les développeurs informatiques à améliorer les logiciels de reconnaissance des visages.

Les guêpes grimées sont plus agressées

Comme souvent en science, la découverte que les guêpes se reconnaissent visuellement a été fortuite. Jeune diplômée, l'une de nous (Elizabeth Tibbetts) travaillait en 2001 sur un projet visant à étudier les détails de la vie sociale des guêpes *Polistes fuscatus*. Le projet nécessitait de peindre des points colorés sur leur dos, puis de filmer les colonies et d'observer les insectes interagir. Un jour, E. Tibbetts a filmé une colonie où, par mégarde, deux guêpes n'étaient pas marquées. Les données auraient été inutilisables, à moins de trouver un moyen de différencier les deux individus. Lorsqu'elle a visionné l'enregistrement, elle a constaté qu'elle pouvait distinguer les guêpes non marquées en examinant les bandes et taches naturelles (jaunes, brunes et noires) dont est ornée la partie antérieure de leur tête. Et si les guêpes en faisaient autant ?

Intriguée, E. Tibbetts a passé les jours suivants à observer l'extraordinaire diversité des motifs « faciaux » des guêpes, puis elle a cherché à savoir si les insectes utilisaient ces motifs pour reconnaître les individus. En appliquant de la peinture pour modèles réduits à l'aide de cure-dents, elle a modifié les traits faciaux d'une guêpe, puis en a observé les conséquences sociales. Les agressions sont rares dans les colonies de guêpes, de sorte qu'un comportement plus agressif envers la guêpe modifiée prouverait que les guêpes prêtent attention aux traits de leurs congénères. Comme contrôle, E. Tibbets a aussi appliqué de la peinture à certains insectes sans modifier leur apparence, pour exclure la possibilité que les guêpes réagissent à la peinture elle-même, indépendamment de son effet visuel.

Elle a observé que les compagnons de nid étaient beaucoup plus agressifs envers les guêpes d'apparence modifiée qu'envers les sujets témoins ; pour ces derniers, les interactions avec leurs compagnons de nid se poursuivaient normalement.

LES AUTEURS

Elizabeth TIBBETTS est maître de conférences à l'Université du Michigan, aux États-Unis.

Adrian DYER est maître de conférences à l'Université RMIT, à Melbourne en Australie.

Un traitement visuel analytique ou global ?

Nous reconnaissons les personnes en effectuant un traitement global du visage : au lieu d'analyser chaque trait séparément (traitement analytique), nous considérons le visage comme un tout où les traits sont aussi importants que leur agencement. Qu'en est-il des abeilles ? Pour le savoir, Aurore Avarguès-Weber, de l'Université de Toulouse, et ses collègues ont étudié la capacité d'abeilles *Apis mellifera* à distinguer des configurations ressemblant à des visages (deux points pour les yeux, un trait pour le nez et un autre pour la bouche). Les abeilles ont appris à repérer une configuration parmi d'autres, ce qui suggère qu'elles sont capables d'intégrer des traits visuels dans une représentation globale.

Ainsi, les résultats montraient que les guêpes reconnaissent bien leurs congénères individuellement, d'après les motifs de leur tête. E. Tibbetts était stupéfaite, tant la reconnaissance des visages chez l'homme est un processus complexe. Pour reconnaître un visage, nous devons percevoir une configuration particulière de traits faciaux uniques, tels que le nez, la bouche, les yeux et les oreilles, et associer, dans notre cerveau, cette configuration à des informations plus abstraites concernant la personne – par exemple le fait qu'elle soit notre employeur ou notre voisine. Nous devons aussi nous rappeler cette association chaque fois que nous voyons cette personne en particulier.

Fait intéressant, l'apprentissage des visages est plus rapide et précis que l'enregistrement de nombre d'autres types d'informations visuelles complexes. Par exemple, lors d'une réception, on mémorise vite et sans grand effort les visages des autres convives. Il est en revanche plus laborieux d'apprendre des motifs uniques, complexes et visuellement proches, tels les idéogrammes chinois.

Comme les visages, les idéogrammes sont composés d'éléments multiples qui s'assemblent en un tout plus grand ; mais nous mémorisons mieux les visages que l'écriture chinoise, car l'évolution nous a dotés de capacités cérébrales dévolues à cette tâche : dans le cerveau humain, une région nommée gyrus fusiforme est dédiée à la reconnaissance des visages. Ce mécanisme de traitement des informations est si fin qu'il peut être mis en défaut par une simple image présentée à l'envers *(voir l'encadré page ci-contre)*. De même, des modifications mineures des régions critiques d'un visage, telles que les yeux, peuvent gêner notre capacité à reconnaître un visage familier.

Si l'espèce humaine excelle dans la reconnaissance faciale, environ deux pour cent des individus présentent une forme de déficit dans ce domaine. Ces déficits apparaissent parfois à l'âge adulte, à la suite d'une lésion du gyrus fusiforme, mais la plupart semblent héréditaires. Dans certains cas extrêmes, les personnes ont du mal à reconnaître leur conjoint et leurs enfants. Les déficits de la reconnaissance faciale seraient même responsables, au moins en partie, des perturbations du développement social observées chez des individus souffrant de troubles tels que l'autisme.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

La mémorisation faciale a atteint un degré de spécialisation important chez l'homme. Qu'en est-il des guêpes ? Ont-elles évolué indépendamment vers une spécialisation similaire ou analysent-elles les traits faciaux d'une autre façon ? Pour le savoir, E. Tibbetts a d'abord recherché une méthode fiable pour apprendre aux guêpes à s'intéresser à des images « correctes » et à éviter celles considérées comme incorrectes.

En général, les éthologues entraînent les insectes sociaux, telles les abeilles domestiques, à réaliser certaines tâches en les récompensant avec du sucre lorsqu'ils font le bon choix. Les abeilles sont avides de travailler pour obtenir du sucre, car la collecte de nourriture à partager avec les compagnes de nid est l'une de leurs principales tâches. Les guêpes, en revanche, peuvent survivre pendant des semaines sans se nourrir, de sorte que les efforts déployés pour les entraîner à l'aide de récompenses sucrées sont restés vains. E. Tibbetts et son doctorant Michael Sheehan, qui travaille désormais à l'Université de Californie à Berkeley, ont fini par trouver une solution : en appliquant un petit choc électrique aux guêpes lorsqu'elles choisissaient une image incorrecte parmi deux proposées, ils les ont entraînées à aller vers la bonne.

Des systèmes neuronaux spécialisés

Les guêpes ont appris à différencier des paires de cinq types d'images : des têtes de guêpes normales vues de face, des motifs géométriques simples en noir et blanc, des chenilles entières (proies naturelles des guêpes), des têtes de guêpes dont les antennes avaient été supprimées par retouche numérique ou des images brouillées de têtes de guêpes. En seulement 20 essais, les guêpes ont appris à choisir une tête normale spécifique parmi les deux proposées. En revanche, elles avaient plus de difficultés à apprendre à distinguer deux motifs géométriques, deux chenilles, deux têtes sans antennes ou deux têtes brouillées. Notamment, la suppression des antennes ou le réarrangement des éléments composant la tête réduisaient leur capacité de mémorisation visuelle.

Les différences de capacité à mémoriser les têtes avec ou sans antennes apportent des preuves de l'existence, chez cette espèce, de systèmes neuronaux spécialisés dans la mémorisation des têtes de guêpes.

Sans les antennes, les têtes ne sont pas reconnues comme telles : le système visuel des guêpes ne traite plus l'image de façon fiable. Cela suggère que les guêpes, comme les humains, traitent un motif facial de façon globale : au lieu de mémoriser chaque trait séparément, la guêpe perçoit et traite une tête comme un tout. Ainsi, pour que la mémorisation se fasse correctement, les éléments doivent être intacts et bien agencés. L'effet de la suppression des antennes sur la reconnaissance visuelle des guêpes est semblable au trouble qu'entraîne chez un humain une image de visage présentée à l'envers, brouillée ou dont la luminosité est inversée.

Le fait que la reconnaissance visuelle soit un trait commun à des espèces aussi éloignées que les hommes et les guêpes suggère que ce mécanisme serait plus répandu dans le règne animal qu'on ne le pensait, évoluant lorsque les conditions sociales lui sont favorables. Dans le cas des guêpes *P. fuscatus*, les nids sont créés par des groupes de reines qui coopèrent pour survivre, mais qui sont aussi en compétition pour la reproduction. Dans ces situations, se reconnaître et se rappeler le rang de chaque individu dans la hiérarchie de dominance est certainement une stratégie payante, qui a donc été favorisée au fil de l'évolution. À

VISAGE MÉCONNAISSABLE

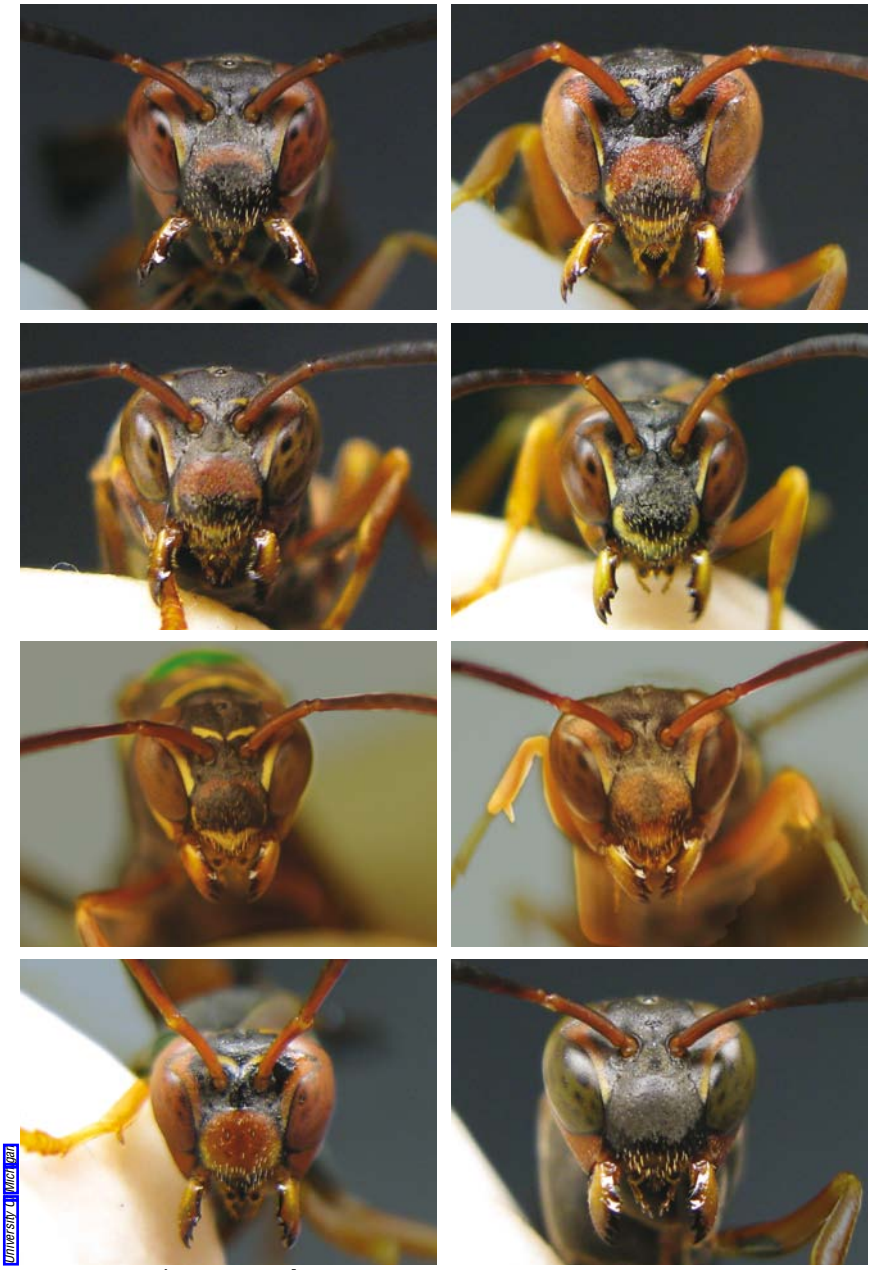
L'illusion de Margaret Thatcher, développée par Peter Thompson de l'Université de York, en Angleterre, révèle que le traitement des visages chez les humains est hautement spécialisé. Nous avons du mal à reconnaître un visage familier lorsque son image est à l'envers ou lorsque des traits essentiels, tels que les yeux et la bouche, sont retournés. Les insectes capables de mémoriser les têtes de leurs congénères hésitent aussi à la vue d'images modifiées. Ils traitent peut-être les informations visuelles de la même façon que l'homme.

Peter Thompson/University of York

l'inverse, un tel mécanisme de reconnaissance visuelle de ses congénères ne devrait pas exister chez les animaux qui n'ont pas besoin de distinguer les individus.

Pour tester cette hypothèse, E. Tibbetts et M. Sheehan ont examiné la mémorisation des têtes chez les guêpes *Polistes metricus*, une espèce proche de *P. fuscatus* mais qui présente une structure sociale différente. Les nids des *P. metricus* sont fondés par une reine solitaire. Avec une seule reine qui se reproduit, les membres du groupe ont peu à gagner à savoir reconnaître les têtes des autres individus. De fait, E. Tibbetts et M. Sheehan ont observé que les guêpes *P. metricus* ne présentent pas de variations des marques faciales et ne reconnaissent pas naturellement les individus. Ils ont alors supposé que, contrairement aux guêpes *P. fuscatus*, dont la structure sociale est plus complexe, les guêpes *P. metricus* n'ont pas de mécanisme cognitif particulier pour traiter les informations associées aux têtes.

Leurs découvertes ont confirmé cette hypothèse. Lorsqu'elles en ont l'occasion, les guêpes *P. metricus* sont capables de mémoriser des têtes, mais cette tâche leur est difficile : elles ne font pas mieux qu'avec d'autres types d'images. De plus, la suppression des antennes n'a aucun effet sur la vitesse ou la précision de leur mémorisation, ce qui indique que cette espèce est dépourvue d'un mécanisme de reconnaissance globale des têtes. Les guêpes traitent les images de leurs congénères comme toute autre image, comme un ensemble de traits indépendants, peut-être comme nous, les humains, pourrions apprendre l'écriture chinoise.



2. CHAQUE GUÊPE DE L'ESPÈCE *POLISTES FUSCATUS* porte des traits uniques sur la partie antérieure de sa tête. Ces insectes utilisent ces motifs pour reconnaître individuellement leurs compagnons de nid. À l'instar des humains, ils perçoivent et traitent ces motifs comme un tout, au lieu de mémoriser chaque trait séparément.

Des abeilles qui distinguent les humains

Lorsqu'on les entraîne, même les guêpes *P. metricus*, sans mécanisme spécialisé, apprennent à mémoriser les têtes de leurs congénères. Des insectes à petits cerveaux auraient-ils la capacité de mémoriser les traits des individus d'une tout autre espèce : l'homme ? Inspiré par les premiers résultats obtenus avec les guêpes, l'un de nous (Adrian Dyer), qui étudie comment les abeilles traitent l'information visuelle, s'est demandé si ces insectes pouvaient apprendre à distinguer les personnes.

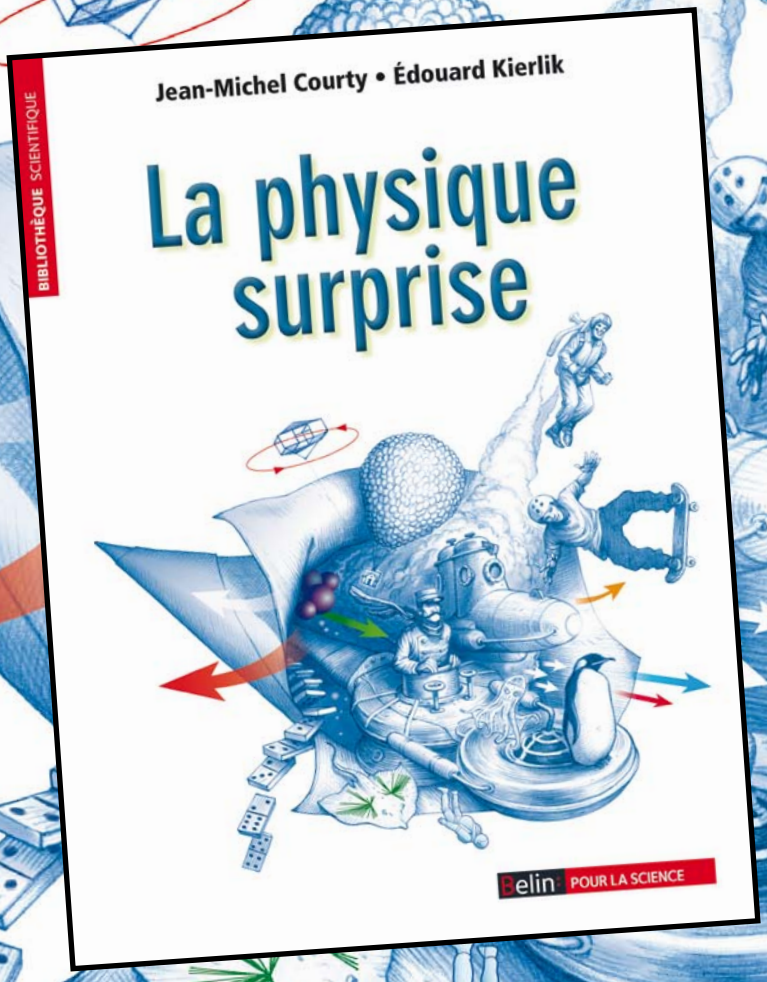
Il a entraîné des abeilles domestiques à distinguer un visage cible d'un visage leurre, en leur présentant des visages humains tirés d'un test standard utilisé en neurosciences. Les visages étaient assez similaires pour que des sujets humains se trompent parfois. Les abeilles recevaient une solution sucrée de saccharose lorsqu'elles visitaient le visage cible et une solution amère de quinine lorsqu'elles se dirigeaient vers le visage leurre. Au bout de 50 essais, les abeilles ont appris à distinguer de façon fiable les deux visages. Elles ont aussi appris à choisir le visage cible parmi tout un groupe de nouveaux visages humains.

D'autres expériences utilisant cette procédure d'entraînement ont révélé des similitudes frappantes entre la stratégie de mémorisation faciale des abeilles et celle des humains. D'abord, même si elles n'avaient pas de circuits cérébraux dédiés à la mémorisation faciale comme les hommes ou les guêpes *P. fuscatus*, les abeilles ont développé une certaine aptitude à traiter les visages de façon globale. Ensuite, elles ont été capables de mémoriser plusieurs angles de vue du même visage et d'interpoler ces informations pour reconnaître de

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

La physique surprise

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



Que nous réserve cette Physique surprise ? Trente-neuf pièces à déguster sans modération, mitonnées par les auteurs. Le style et les croquis, l'actualité et la variété des thèmes vous séduiront, vous amuseront, vous surprendront. Oui, on peut franchir le mur du son en chute libre. Non, les veines ne sont pas bleues. Oui, on peut séparer le chaud et le froid dans un courant d'air. Alors... Bon appétit !

Éditions Belin/Pour la Science 2013
184 pages – 24 euros
ISBN 978-2-8425-5121-9

BON DE COMMANDE

POUR LA SCIENCE

à découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • Tél. : 0 805 655 255 • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

❑ Oui, je commande l'ouvrage *La physique surprise* de J.-M. Courty et É. Kierlik.

..... exemplaires × 24,00 € (Réf. 84245121) = ... €
Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger) + ... €
TOTAL À REGLER = ... €

Je choisis mon mode de règlement :
❑ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ par carte bancaire

Numéro
Date d'expiration
Cryptogramme

Signature obligatoire

J'indique mes coordonnées :
Nom :
Prénom :
Adresse :
C.P. : Ville :
Pays : Tél. : (Pour le suivi client facultatif)

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 ❑.**

E-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscules).
@

PSPLS438
Offre valable jusqu'au 30/04/14 dans la limite des stocks disponibles

Et chez les fourmis ?

Les fourmis ont-elles la même capacité de reconnaissance visuelle des congénères que les guêpes et les abeilles décrites ici ? Les fourmis sont le troisième groupe d'hyménoptères à avoir développé une vie sociale. De plus, alors que certaines guêpes et abeilles ne sont pas sociales, toutes les espèces de fourmis vivent dans des sociétés très organisées, avec une division du travail élaborée. Si la capacité de reconnaître visuellement ses congénères a un lien quelconque avec la vie sociale, les fourmis devraient elles aussi avoir développé cette capacité, d'autant que leur cerveau ressemble à celui des guêpes et des abeilles, et que certaines espèces de fourmis utilisent la vision pour s'orienter.

Les fourmis du désert, par exemple, apprennent la position de repères visuels et les utilisent pour retourner à leur nid après une exploration sur plusieurs centaines de mètres. Elles utilisent aussi la position du Soleil et la polarisation de la lumière associée pour s'orienter. Les fourmis des bois sont capables de distinguer deux stimulus de différentes couleurs et deux motifs en noir et blanc. Cependant, les expériences réalisées avec les abeilles n'ayant pas été reproduites avec les fourmis, on ignore si des espèces de fourmis utilisant de préférence la vue pourraient reconnaître visuellement leurs congénères.

Une différence importante existe toutefois entre les fourmis et les guêpes du genre *Polistes* : les fourmis sont de couleur uniforme et leur tête ne présente pas de traits distinctifs, propres à l'individu. Ainsi, dans la nature, les fourmis ne peuvent utiliser la variabilité des traits visuels d'un individu à l'autre pour les reconnaître, comme le fait la guêpe *Polistes fuscatus*. De plus, alors que le nid des guêpes est exposé à la lumière, les fourmis vivent sous terre, dans la pénombre.

Dans ce monde obscur, elles utilisent les odeurs pour communiquer. Les guêpes et les abeilles aussi, mais les fourmis présentent de nombreuses glandes qui émettent une multitude de signaux chimiques. Comme chez les guêpes *P. fuscatus*, les jeunes reines de certaines espèces de fourmis se reconnaissent individuellement, mais à l'aide de la communication chimique.

Les jeunes reines de *Pachycondyla villosa* et *Pachycondyla inversa*, des espèces tropicales, s'associent en petits groupes pour fonder de nouvelles colonies. Lors du regroupement, elles s'affrontent et établissent une hiérarchie de dominance qui répartit les tâches : la reine dominante reste dans le nid et pond la plupart des œufs, tandis que les reines subordonnées fouillent les environs à la recherche de nourriture. Dans ce système, la reconnaissance des individus est avantageuse, car elle facilite le maintien d'une hiérarchie stable et évite le coût d'affrontements agressifs répétés. Chaque reine présente une odeur corporelle unique, mémorise celle des reines associées et s'en souvient même 24 heures après leur séparation. Les fourmis ont donc bien elles aussi la capacité cognitive nécessaire à la reconnaissance individuelle. Elles utilisent juste un autre canal de communication.

Patrizia d'Ettorre
Laboratoire d'éthologie expérimentale et comparée, Université Paris 13, Villetaneuse

nouvelles présentations. Par exemple, une fois qu'une abeille avait appris à reconnaître un visage de face et de profil, elle choisissait correctement une image du même visage tourné de 30 degrés, même si elle n'avait jamais vu cette image auparavant.

La capacité des abeilles à mémoriser des visages est inattendue, car la société des abeilles est constituée d'une seule reine et de nombreuses ouvrières à l'aspect similaire. La tête des abeilles ne présente pas de marques distinctives et leurs interactions dans la ruche reposent sur des signaux plus souvent chimiques (phéromones) que visuels.

Cette nouvelle voie de recherches pourrait faciliter le développement de systèmes de reconnaissance automatique des visages. Identifier le même visage vu sous des angles différents en constitue l'un des principaux défis. Pourtant, les minuscules cerveaux des abeilles y parviennent. Quand on aura décrypté comment, on disposera de clés pour améliorer les logiciels de reconnaissance faciale.

Ces travaux apportent aussi une nouvelle compréhension de la façon dont la reconnaissance visuelle des congénères a évolué. Le système simple qui permet aux guêpes *P. metricus* et aux abeilles d'apprendre à reconnaître des « faces » dans le cadre expérimental, alors qu'elles ne distinguent pas les individus habituellement, pourrait être fondé sur les capacités de reconnaissance de motifs que ces espèces utilisent pendant la recherche de nourriture. Il pourrait aussi constituer une étape évolutive intermédiaire de la reconnaissance visuelle des congénères.

Lorsque les ancêtres des actuelles guêpes *P. fuscatus* se sont retrouvées dans un nouvel environnement social, où la distinction des individus les aidait à survivre et à se reproduire, elles ont pu apprendre à identifier les individus. Au fil du temps, la sélection naturelle s'est probablement effectuée sur cette base : des modifications du cerveau facilitant la reconnaissance des congénères ont été sélectionnées au fil des générations, ce qui a augmenté la capacité des guêpes à distinguer un « ami » d'un « ennemi ».

Le système intermédiaire a permis à cette adaptation d'évoluer rapidement : les guêpes *P. fuscatus* et *P. metricus* sont étroitement apparentées et leur dernier ancêtre commun devait posséder le système de mémorisation plus primitif observé chez les guêpes *P. metricus*. Ainsi, l'adaptation biologique des guêpes *P. fuscatus* à l'analyse efficace des traits visuels a dû évoluer récemment, après la divergence des deux lignées.

Alors, la prochaine fois que vous sortez dans votre jardin, prenez une minute pour apprécier les guêpes et les abeilles qui y butinent. Dans leur minuscule cerveau, il se passe bien plus de choses qu'on ne le croyait. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. J. Sheehan et E. A. Tibbetts, **Specialized face learning is associated with individual recognition in paper wasps,** *Science*, vol. 334, pp. 1272-1275, 2011.

O. Riabinina *et al.*, **Do wood ants learn sequences of visual stimuli ?**, *J. Exp. Biol.*, vol. 214, pp. 2739-2748, 2011.

A. Avarguès-Weber *et al.*, **Configural processing enables discrimination and categorization of face-like stimuli in honeybees,** *J. of Exp. Biol.*, vol. 213, pp. 593-601, 2010.

E. A. Tibbetts et J. Dale, **Individual recognition : It is good to be different,** *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 22, pp. 529-537, 2007.

S. Dreier *et al.*, **Long term memory of individual identity in ant queens,** *Biology Letters*, vol. 3, pp. 459-462, 2007.

P. d'Ettorre et J. Heinze, **Individual recognition in ant queens,** *Current Biology*, vol. 15, pp. 2170-2174, 2005.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

CHAQUE MOIS

CHAQUE TRIMESTRE

Retrouvez vos magazines en kiosque ou directement chez vous

POUR LA SCIENCE

La référence de l'actualité scientifique internationale

LES VERSIONS NUMÉRIQUES
feuilletables en PDF sur le site et dans l'application à partir de 4,49 €

L'APPLICATION
pour smartphone et tablette téléchargeable sur Appstore et Google Play

DES CONTENUS INÉDITS
sur le site

Suivez *Pour la Science* également sur :

WWW.POURLASCIENCE.FR

Des **coïncidences** pas si étranges

David Hand

Quand deux tirages successifs du loto donnent les mêmes numéros gagnants, faut-il être surpris ? En fait, de telles coïncidences, qui nous paraissent très improbables, se produisent souvent – et cela en conformité avec la théorie des probabilités.

D'après tout un ensemble de lois mathématiques, que je surnomme collectivement « principe d'improbabilité », les coïncidences ne devraient pas nous surprendre. En fait, nous devrions nous attendre à observer des coïncidences. L'un des aspects clefs de ce principe est la loi des « vraiment grands » nombres. D'après cette loi, étant donné un nombre suffisant d'occasions, on doit s'attendre à ce qu'un événement donné se produise, même s'il est très improbable à chaque occasion.

Parfois, cependant, alors que les occasions sont vraiment très nombreuses, on peut avoir l'impression qu'elles sont relativement rares. Cette erreur de perception nous conduit à sous-estimer considérablement la probabilité d'un événement : nous pensons qu'une situation est incroyablement improbable, alors qu'en fait elle est très probable, voire presque inévitable.

Comment peut-il exister un nombre énorme d'occasions sans que l'on en ait conscience ? La loi des combinaisons, un volet apparenté au principe d'improbabilité, indique comment. Elle montre que le nombre de combinaisons d'éléments en interaction augmente très rapidement avec le nombre d'éléments.

Le « problème des anniversaires » en est un exemple bien connu. On se pose la question suivante : combien de personnes au minimum un groupe doit-il contenir pour qu'il y ait plus d'une chance sur deux que deux personnes de ce groupe, qui qu'elles soient, aient leur anniversaire le même jour ? La réponse est : seulement 23. Si le groupe compte 23 personnes ou plus, alors il y a davantage de chances que deux d'entre elles aient le même jour anniversaire plutôt qu'il n'y ait aucun duo de ce type dans le groupe.

La combinatoire des anniversaires

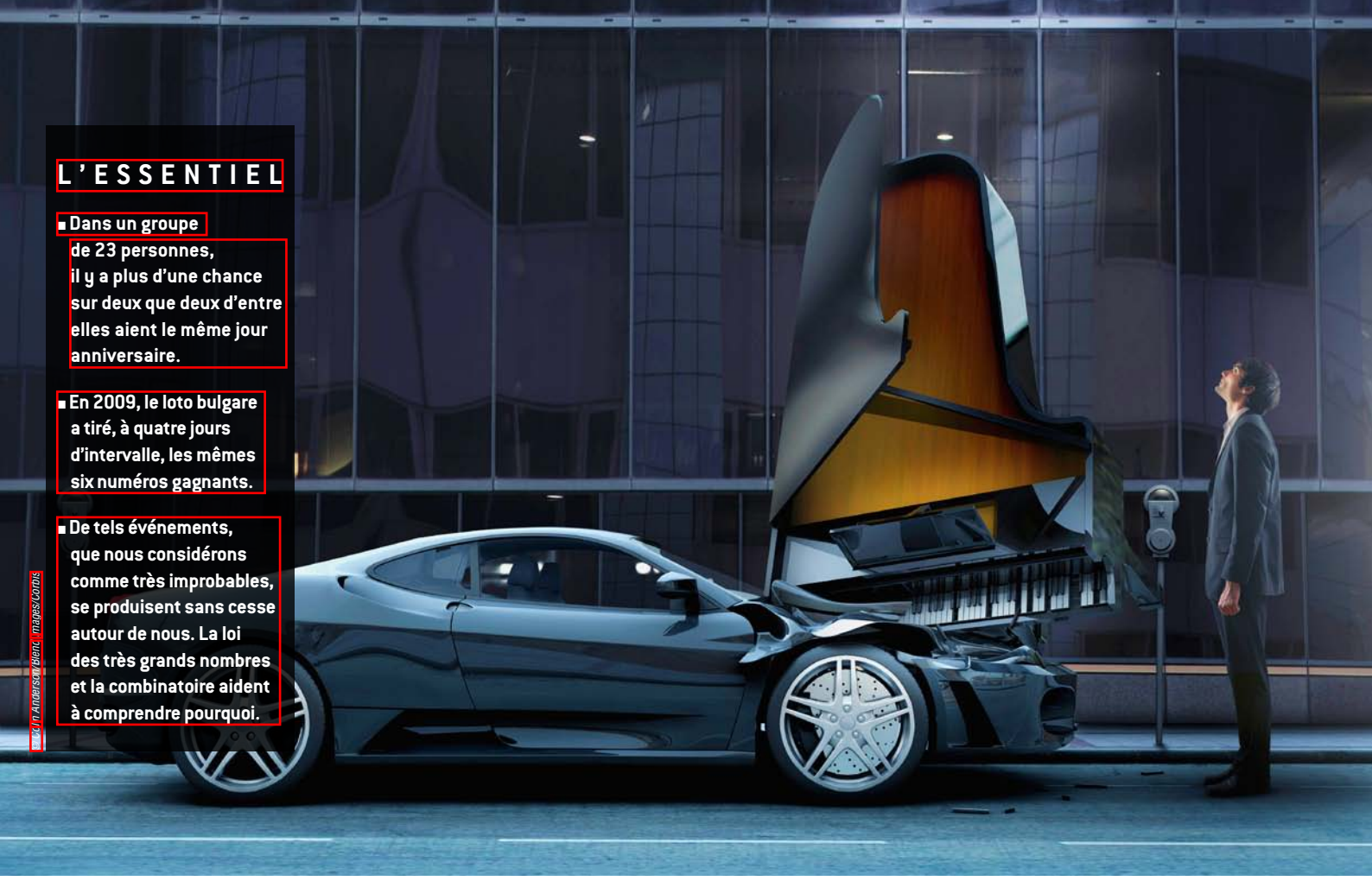
À ce stade, si vous n'avez jamais entendu parler de ce « paradoxe » des anniversaires, vous serez peut-être étonné. Le nombre 23 vous semble sans doute beaucoup trop petit. Vous avez peut-être tenu le raisonnement suivant : il n'y a qu'une chance sur 365 qu'une autre personne donnée ait la même date d'anniversaire que moi. Il y a donc 364 chances sur 365 qu'une personne donnée ait une date d'anniversaire différente de la mienne.

Si je suis dans un groupe de n personnes, chacune des $n-1$ autres personnes ayant une probabilité égale à $364/365$ d'avoir une date anniversaire différente de la mienne, alors la probabilité que toutes ces $n-1$ personnes aient une date anniversaire différente de la mienne est égale à $364/365 \times 364/365 \times 364/365 \times 364/365 \times \ldots \times 364/365$, c'est-à-dire $364/365$ multiplié $n-1$ fois par lui-même. Si n est égal à 23, ce produit donne 0,94.

Puisque 0,94 est la probabilité qu'aucune de ces personnes n'ait la même date anniversaire que moi, la probabilité qu'au moins l'une d'entre elles ait la même date anniversaire que moi vaut seulement $1 - 0{,}94$ (en effet, puisque soit quelqu'un a la même date anniversaire que moi, soit personne n'a la même date anniversaire que moi, la somme des probabilités de ces deux événements est nécessairement égale à 1). Or $1 - 0{,}94$ est égal à 0,06, nombre qui est très petit.

Mais ce n'est pas le bon calcul à faire. Cette probabilité (la probabilité que quelqu'un ait la même date d'anniversaire que moi) ne répond pas à la question posée. En effet, il s'agit plutôt de savoir si deux personnes quelconques de l'assemblée ont la même date anniversaire. Cela inclut la probabilité que quelqu'un d'autre ait la même date d'anniversaire que moi – c'est

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014



L'ESSENTIEL

- Dans un groupe de 23 personnes, il y a plus d'une chance sur deux que deux d'entre elles aient le même jour anniversaire.
- En 2009, le loto bulgare a tiré, à quatre jours d'intervalle, les mêmes six numéros gagnants.
- De tels événements, que nous considérons comme très improbables, se produisent sans cesse autour de nous. La loi des très grands nombres et la combinatoire aident à comprendre pourquoi.

Jon Anderson (bleinc, magesy.com)

ce qu'on a calculé plus haut –, mais cela inclut également la probabilité que deux (ou plus) des autres personnes partagent une même date anniversaire, différente de la mienne.

C'est là que la combinatoire entre en jeu. Tandis qu'il n'y a que $n-1$ personnes du groupe susceptibles de partager ma date d'anniversaire, le nombre de paires formées de deux personnes différentes et prises dans un groupe de n personnes est égal à $n(n-1)/2$. Ce nombre de paires croît rapidement quand n augmente. Quand n est égal à 23, on arrive à 253, ce qui est plus de dix fois supérieur à $n-1=22$. En d'autres termes, si l'assemblée compte 23 personnes, il y a 253 paires possibles de personnes, dont seulement 22 m'incluent.

Considérons alors la probabilité qu'il n'existe aucune paire, prise parmi ces 23 personnes, dont les deux membres aient le même jour anniversaire. Pour deux personnes, la probabilité que la seconde personne n'ait pas la même date d'anniversaire que la première est de 364/365. Ensuite, la probabilité que ces deux personnes-là aient des jours anniversaires différents et qu'une troisième personne ne partage son anniversaire ni avec l'une ni avec l'autre est égale à $364/365 \times 363/365$. De la même façon, la probabilité que ces trois-là aient des dates d'anniversaire différentes et qu'une quatrième personne ne partage son anniversaire avec aucune des trois premières est égale à $364/365 \times 363/365 \times 362/365$. En continuant ainsi, on obtient que la probabilité qu'aucune des 23 personnes n'ait la même date d'anniversaire qu'une autre est égale à $364/365 \times 363/365 \times 362/365 \times 361/365 \times \ldots \times 343/365$.

Ce produit vaut 0,49. Parce que la probabilité qu'aucune des 23 personnes ne partage la même date anniversaire vaut 0,49, la probabilité que certaines d'entre elles aient le même jour anniversaire est égale à $1-0{,}49$, soit 0,51 : ce nombre est supérieur à 1/2.

Des loteries qui se répètent

Un autre exemple d'événement improbable en apparence mais qui ne l'est en fait pas du tout est fourni par les loteries. Le 6 septembre 2009, le loto bulgare a tiré au hasard les numéros gagnants 4, 15, 23, 24, 35 et 42. Ces numéros ne sont pas insolites. Certes, les chiffres qui les composent (1, 2, 3, 4 et 5) sont tous petits, mais cela n'a rien d'extraordinaire. Par ailleurs, la combinaison gagnante comporte une paire de nombres consécutifs, 23 et 24, mais cela arrive plus souvent qu'on ne le croit (si l'on demande à des gens de choisir au hasard six nombres compris entre 1 et 49, ils choisiront moins souvent des paires de nombres consécutifs qu'il n'y en aurait dans un tirage purement aléatoire).

LA CHUTE D'UN PIANO SUR UNE VOITURE est très improbable. Mais les déménagements de piano et les voitures sont très nombreux...

Ce qui est insolite, c'est ce qui s'est produit quatre jours plus tard : le 10 septembre, la loterie bulgare a tiré les numéros gagnants 4, 15, 23, 24, 35, 42 – exactement les mêmes nombres que la semaine précédente. L'événement a provoqué à l'époque une tempête médiatique. « C'est la première fois que cela arrive depuis 52 ans que le loto existe. Nous sommes absolument abasourdis d'assister à une telle coïncidence, mais cela s'est produit », déclarait une porte-parole le 18 septembre dans une dépêche de l'agence de presse *Reuters*. Le ministre des sports bulgare de l'époque, Svilen Neikov, ordonna une enquête. Une fraude massive aurait-elle

Permutations, combinaisons et arrangements

Trois objets distincts A, B et C peuvent être ordonnés de six façons différentes : ABC, ACB, BAC, BCA, CAB, CBA. Chacune de ces façons est une *permutation* de l'ensemble {A, B, C}. Plus généralement, pour n objets distincts, il existe $n\,!$ permutations, où $n\,!$ (prononcé « factorielle n ») désigne le produit $n \times (n-1) \times (n-2) \times \ldots \times 2 \times 1$.

Dans un ensemble {A, B, C} de trois objets distincts, on a trois façons de choisir deux des objets : on peut choisir {A, B}, {B, C} ou {A, C}. Chacun de ces trois sous-ensembles est une *combinaison* de deux objets choisis parmi trois. Plus généralement, étant donné un ensemble de n objets distincts, il existe $C(n,p) = n\,!/[p\,!\,(n-p)\,!]$ combinaisons de p objets parmi les n. Autrement dit, il existe $n\,!/[p\,!\,(n-p)\,!]$ façons de choisir p objets parmi n. Dans les combinaisons, on ne tient pas compte de l'ordre dans lequel sont placés les objets. S'il faut tenir compte de l'ordre, on parle d'*arrangements*. On a ainsi six arrangements différents de deux objets pris parmi trois : AB, BA, BC, CB, AC, CA. Plus généralement, le nombre d'arrangements de p objets pris parmi n est $A(n, p) = n\,!/(n-p)\,!$ (c'est le nombre de combinaisons multiplié par $p\,!$, le nombre de permutations de p objets).

été commise ? Les numéros précédents auraient-ils pu être copiés d'une quelconque manière ?

En fait, cette coïncidence assez stupéfiante était simplement un autre exemple du principe d'improbabilité. Premièrement, de nombreuses loteries sont organisées de par le monde. Deuxièmement, elles ont lieu de manière très répétée, depuis des années. Cela s'additionne pour donner un très grand nombre de tirages, où les numéros tirés vont pouvoir éventuellement se répéter. Et troisièmement, la combinatoire intervient : chaque fois qu'il y a tirage, on peut obtenir les mêmes numéros qui ont été produits dans l'un quelconque des tirages précédents. De façon générale, comme on l'a vu avec les anniversaires, si l'on effectue n tirages du loto, on a $n(n-1)/2$ paires de tirages, chacune de ces paires étant susceptible de produire une combinaison gagnante identique.

Le loto bulgare qui a produit des combinaisons identiques en 2009 est un loto où l'on tire six numéros sur 49. Or il existe $49\,!/[6\,!\,(49-6)\,!] = (49 \times 48 \times 47 \times 46 \times 45 \times 44)/(6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2) = 13\,983\,816$ ensembles différents de six numéros choisis parmi 49 (il s'agit de combinaisons, où l'on ne tient pas compte de l'ordre dans lequel sont tirés les numéros) *(voir l'encadré ci-dessus)*. La probabilité de tirer une combinaison donnée de six numéros est donc égale à $1/13\,983\,816$. Cela signifie que la probabilité que deux tirages donnés produisent la même combinaison vaut $1/13\,983\,816$.

Mais quelle est la probabilité que deux tirages quelconques parmi trois donnent la même combinaison ? Ou quelle est la probabilité que deux tirages quelconques parmi 50 produisent la même combinaison ?

Dans le cas de trois tirages, notés par exemple A, B et C, il existe trois paires possibles de tirages ((A, B), (B, C) et (A, C)). Mais avec 50 tirages, on a 1 225 paires possibles. Et avec 1 000 tirages, il y a 499 500 paires possibles. La combinatoire entre en jeu. Quand on fait passer le nombre de tirages de 50 à 1 000, ce qui correspond à une multiplication par un facteur 20, l'impact sur le nombre de paires est beaucoup plus grand : en passant de 1 225 à 499 500, il est multiplié par près de 408. On entre dans le domaine des nombres vraiment grands.

Avec des milliers de tirages, la coïncidence ne doit plus étonner

Combien de tirages faudrait-il pour que la probabilité de tirer deux fois les six mêmes numéros soit supérieure à 1/2, c'est-à-dire pour que cet événement ait davantage de chances de se produire que de ne pas se produire ? En utilisant la même méthode que pour le problème des anniversaires, on obtient comme réponse 4 404.

À raison de deux tirages par semaine, on en a 104 par an. Il faudra alors moins de 43 ans pour atteindre 4 404 tirages. En d'autres termes, au bout de 43 ans, il y a davantage de chances qu'il y ait deux combinaisons gagnantes du loto identiques que le contraire. Cela jette un éclairage assez différent sur le commentaire de la porte-parole bulgare selon laquelle il s'agissait d'une coïncidence bizarre !

Et cela n'est pas valable que pour une loterie déterminée. Quand on prend en compte toutes les loteries dans le monde, on comprend qu'il serait surprenant que les tirages ne se répètent pas de temps en temps. Vous ne serez donc pas étonnés d'apprendre que pour la loterie nationale israélienne, les numéros tirés le 16 octobre 2010 (13, 14, 26, 32, 33, 36) étaient exactement les mêmes que ceux tirés quelques semaines plus tôt, le 21 septembre. Vous ne serez pas étonnés, contrairement aux dizaines de personnes qui ont envahi les programmes radiophoniques d'Israël pour se plaindre que le loto était truqué.

Le résultat du loto bulgare était inhabituel du fait que les combinaisons gagnantes identiques ont été obtenues par deux tirages consécutifs. Mais en raison de la loi des vraiment grands nombres, combi-

L'AUTEUR

David HAND est professeur émérite de mathématiques et directeur de recherche à l'*Imperial College* de Londres. Il est ancien président de la Société royale de statistiques.

Article adapté de l'ouvrage de D. Hand, ***The Improbability Principle : Why Coincidences, Miracles, and Rare Events Happen Every Day***, Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2014.

BIBLIOGRAPHIE

F. Sauvageot, **Coïncidences**, *Images des mathématiques*, CNRS, 2011 (http://images.math.CNRS.fr/Coincidences.html).

D. J. Hand, **Statistics : A Very Short Introduction**, Oxford University Press, 2008.

I. Stewart, **Quelle coïncidence !**, *Pour la Science* n° 249, pp. 106-107, 1998.

J. Bérard, **Introduction aux probabilités et à la statistique**, http://math.univ-lyon1.fr/~jberard/cours-www.pdf

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

née à l'existence de nombreuses loteries régulières, on ne devrait pas être trop surpris. La loterie *Cash 5* de la Caroline du Nord, aux États-Unis, a ainsi produit les mêmes numéros gagnants les 9 et 11 juillet 2007.

Un autre exemple de coïncidence (plutôt frustrante) est ce qui est arrivé à Maureen Wilcox en 1980, aux États-Unis. Cette personne avait acheté des billets comportant les numéros gagnants à la fois pour la loterie de l'État du Massachusetts et pour celle de Rhode Island. Malheureusement pour elle, son billet de la loterie du Massachusetts avait les numéros gagnants de la loterie de Rhode Island, et *vice-versa*.

Si vous achetez un billet pour chacune de dix loteries, vous avez dix chances de gagner. Mais avec dix billets, on a 45 paires différentes de billets. Par conséquent, la probabilité que l'un des dix billets corresponde à l'un des dix tirages de loterie est plus de quatre fois supérieure à votre probabilité de gagner. Ce n'est pas une recette pour faire fortune : vous ne gagnez rien en ayant sur votre billet d'une certaine loterie la combinaison gagnante d'une autre loterie – à part le sentiment que l'Univers se joue de vous.

La loi des combinaisons s'applique quand un grand nombre d'éléments (personnes, objets, etc.) interagissent. Considérons par exemple une classe de 30 étudiants. Ces personnes peuvent interagir de nombreuses façons. Les étudiants peuvent travailler tout seuls : ils sont 30. Ils peuvent travailler en binômes ; il existe 435 binômes différents possibles. Ils peuvent travailler en trinômes ; il existe 4 060 triplets possibles. Et ainsi de suite, jusqu'à ce que tous travaillent ensemble, et là bien sûr il n'y a plus qu'un ensemble de 30 étudiants travaillant ensemble.

Au total, le nombre de groupes possibles différents d'étudiants que l'on peut former (groupes de un étudiant, groupes de deux étudiants, groupes de trois étudiants, etc.) est 1 073 741 823. On dépasse le million, et tout cela avec seulement 30 étudiants. De façon générale, si un ensemble contient n éléments, on a $2^n - 1$ sous-ensembles possibles. Si $n = 100$, le résultat est $2^{100} - 1$, ce qui est égal à environ 10^{30}, un nombre indéniablement grand.

Au cas où 10^{30} ne serait toujours pas assez grand pour vous, considérez le Web, qui a environ 2,5 milliards d'utilisateurs. Chacun de ces internautes peut interagir avec tous les autres. Cela donne 3×10^{18} paires possibles et, au total, $10^{750\,000\,000}$ groupes possibles d'internautes en interaction. Même des événements de très faible probabilité deviennent pratiquement certains si vous leur donnez autant d'occasions de se produire.

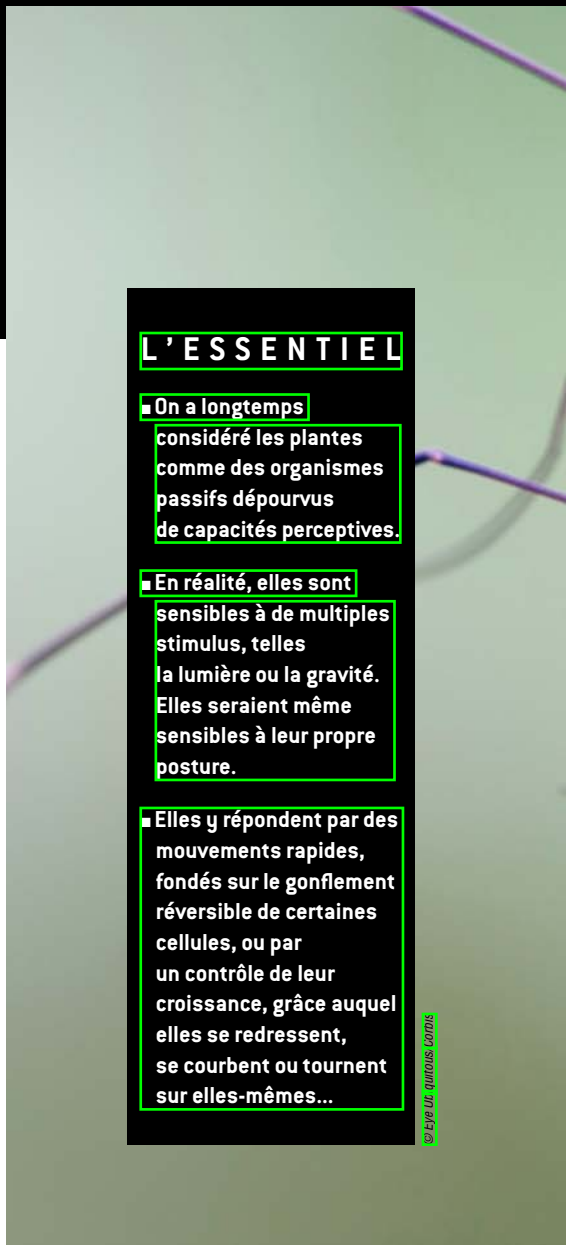
LA PROCHAINE FOIS QUE VOUS FAITES l'expérience d'une coïncidence qui vous semble étrange, rappelez-vous le principe d'improbabilité !

La prochaine fois que vous faites l'expérience d'une coïncidence qui semble étrange, rappelez-vous le principe d'improbabilité ! ■

Percevoir et bouger : les plantes aussi !

Catherine Lenne, Olivier Bodeau et Bruno Moulia

Les plantes perçoivent leur environnement et s'y adaptent par diverses formes de mouvements. Des capacités qu'on a longtemps cru réservées aux animaux et que l'on commence à décrypter.



L'ESSENTIEL

- On a longtemps considéré les plantes comme des organismes passifs dépourvus de capacités perceptives.
- En réalité, elles sont sensibles à de multiples stimulus, telles la lumière ou la gravité. Elles seraient même sensibles à leur propre posture.
- Elles y répondent par des mouvements rapides, fondés sur le gonflement réversible de certaines cellules, ou par un contrôle de leur croissance, grâce auquel elles se redressent, se courbent ou tournent sur elles-mêmes...

© Eye Of Gatois Corbis

Les animaux perçoivent le monde extérieur et réagissent en conséquence, souvent par des mouvements visibles et rapides. À l'inverse, les plantes sont fixées au sol par leurs racines et paraissent immobiles. Seul le vent semble les mettre en mouvement. Dès lors, on a longtemps cru les plantes incapables de percevoir leur environnement et d'y répondre par des mouvements actifs adaptés *(voir l'encadré page 44)*.

Toutefois, cette passivité végétale n'est qu'une apparence, due à la lenteur des mouvements en jeu. Quand on filme une plante et que l'on passe la séquence d'images en accéléré, le résultat est spectaculaire : les fleurs s'ouvrent et se ferment, des tiges artificiellement penchées se redressent et s'élancent vers le ciel, les lianes explorent l'espace puis s'enroulent autour d'un support… Qui plus est, comme on le verra, certaines plantes ont même des mouvements rapides et étonnants, visibles à l'œil nu.

Au cours des 20 dernières années, l'étude quantitative des mouvements lents a connu un essor important, notamment grâce à de nouvelles techniques d'imagerie *in vivo*. Elle a révélé chez les plantes une sensorimotricité complexe et généralisée, c'est-à-dire une sensibilité qui leur permet d'effectuer des mouvements adaptés à leur environnement. Par sensibilité, on entend une capacité à percevoir des stimulus de natures diverses (lumière, température, gravité, pression mécanique, concentration d'une espèce chimique, etc.), émis ou non par d'autres organismes vivants. Et par motricité, on entend des mouvements actifs utilisant l'énergie des cellules. C'est probablement en partie grâce à cette sensorimotricité que les plantes à fleurs (angiospermes) ont colonisé la terre ferme il y a environ 140 millions d'années.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

Quels sont les mécanismes qui assurent cette sensibilité ? Chez les animaux, les stimulus physiques ou chimiques sont captés par des cellules particulières et traduites en signaux électriques : l'influx nerveux. Ce dernier est acheminé jusqu'à un système nerveux central – le cerveau ou la moelle épinière –, où il est intégré à d'autres informations pour former une perception de l'environnement extérieur. Une réaction motrice (mobilisant le moteur biomécanique qu'est la musculature) est alors déclenchée – ou pas. Quand la moelle épinière est le seul centre nerveux impliqué, le mouvement est stéréotypé et qualifié de réflexe. Chez les plantes, les scientifiques ont découvert des moteurs biomécaniques différents de la musculature. Ils ont aussi montré que les perceptions et les réactions qui s'ensuivent reposent à la fois sur des mécanismes locaux et sur la circulation d'hormones et de signaux électriques comparables, dans une certaine mesure, à l'influx nerveux.

Comme nous le verrons, certains des mécanismes en jeu ont été élucidés au cours des dernières années. Mais avant de les décrire, présentons les différents types de mouvements observés chez les plantes.

L'étude des mouvements des plantes en réponse à des stimulus a fait l'objet d'une longue série de découvertes, qui s'accélère aujourd'hui. Au XIX^{e} siècle, Charles Darwin a étudié avec son fils Francis la réaction des plantes à une perturbation environnementale. Ils ont par exemple éclairé latéralement des graminées qui venaient de germer et constaté qu'elles se courbent lentement, finissant par s'aligner sur la direction de la source lumineuse. On qualifie de tropismes (du grec *tropein*, tourner) de tels mouvements directionnels en réaction à une anisotropie du milieu.

1. LA DIONÉE ATTRAPE-MOUCHE se referme comme un piège à loup sur les insectes qui effleurent ses poils sensibles. Cette plante carnivore est donc dotée de sensibilité et de motricité. Chez la plupart des autres plantes, ces facultés sont moins visibles, mais néanmoins présentes.

Jusqu'à ces dernières années, les tropismes ont été classés selon la nature du facteur orientant le mouvement. Celui de l'expérience des Darwin est ainsi un phototropisme, lié à la lumière. À la fin des années 1990, les biologistes ont mis en évidence un autre type de phototropisme, associé à des longueurs d'onde particulières : lorsque des réflecteurs renvoient une lumière caractéristique de celle réfléchie par les tissus chlorophylliens des végétaux, les plantes situées à proximité s'en écartent (leur croissance s'oriente dans la direction opposée) ou accélèrent leur croissance en hauteur. Ainsi, les plantes « voient » leurs voisines.

En 1999, l'un de nous (B. Moulia) et ses collègues ont même montré qu'un plant de maïs peut détecter les autres végétaux à plus de trois mètres de distance. Grâce à cette capacité sensorimotrice, les plantes évitent que leurs voisines ne leur fassent trop d'ombre, ce qui est utile dans la compétition entre espèces ou entre individus partageant la même niche écologique.

Il existe de multiples tropismes. L'héliotropisme, un type particulier de phototropisme, est lié à la course du soleil (ainsi, avant la floraison, le tournesol tourne son capitule vers le soleil au fil de la journée). Le gravitropisme est lié à la perception de la verticale (il peut concerner les racines, qui s'enfoncent dans le sol parallèlement au champ de pesanteur, ou les tiges et les troncs inclinés, qui se redressent vers le ciel). Le thigmotropisme est lié à une stimulation tactile (le grec *thigmo* signifie toucher). C'est ainsi que des lianes s'allongent jusqu'à toucher un support, puis s'enroulent autour de lui.

Outre les tropismes, il existe des mouvements végétaux non orientés, nommés nasties. Ils peuvent être déclenchés par la lumière (photonastie, comme avec le pissenlit qui s'ouvre le matin et se referme plus tard dans la matinée), par la température ambiante (thermonastie, comme avec les tulipes qui s'ouvrent quand elles sont placées au chaud) ou par une stimulation tactile (thigmonastie).

Ce dernier cas a constitué le premier exemple connu de sensorimotricité, car il est associé à des réponses rapides. Ainsi, la sensitive *(Mimosa pudica)*, une petite plante tropicale d'origine américaine, replie ses feuilles en quelques secondes quand on les touche *(voir l'encadré page ci-contre)*. Chez la dionée attrape-mouche *(Dionaea muscipula)*, une plante carnivore, les feuilles se referment comme des pièges à loup sur les insectes qui effleurent les poils sensibles de leur nervure centrale.

Certaines plantes, tel le haricot, manifestent une troisième catégorie de mouvements actifs, constituée de révolutions régulières et nommée circumnutation : le sommet de la jeune tige monte en spirale, jusqu'à ce qu'il touche un support. La circumnutation évolue ensuite en thigmotropisme et la tige s'enroule autour de l'obstacle.

Enfin, la croissance en hauteur est elle aussi influencée par divers facteurs, tels que les sollicitations mécaniques (on parle alors de thigmomorphogénèse). Par exemple, quand on courbe une plante et qu'on la relâche (imitant ainsi l'effet du vent), elle ralentit sa croissance en hauteur pour privilégier l'augmentation de son épaisseur. Nous avons montré en 2000 que cette adaptation est déclenchée par une sensibilité à la déformation de certaines cellules.

Cette classification est aujourd'hui remise en cause, accusée d'être trop restrictive. Elle suggère qu'un stimulus unique déclenche un comportement stéréotypé, tandis qu'on s'est aperçu que les plantes combinent de multiples signaux et mouvements. En 2012, Mieke de Wit, de l'Université d'Utrecht aux Pays-Bas, et ses collègues ont montré que l'arabette des dames *(Arabidopsis thaliana)*, une plante formant une rosette de feuilles horizontales plaquées au sol, perçoit les contacts prolongés avec ses voisines. Ce toucher appuyé entraîne le redressement des feuilles en quelques heures, ce qui accentue la réflexion de certains rayonnements caractéristiques. Ce « geste » est alors perçu par les voisines et provoque l'arrêt de leur croissance foliaire, limitant ainsi les risques de se faire de l'ombre.

Les moteurs végétaux

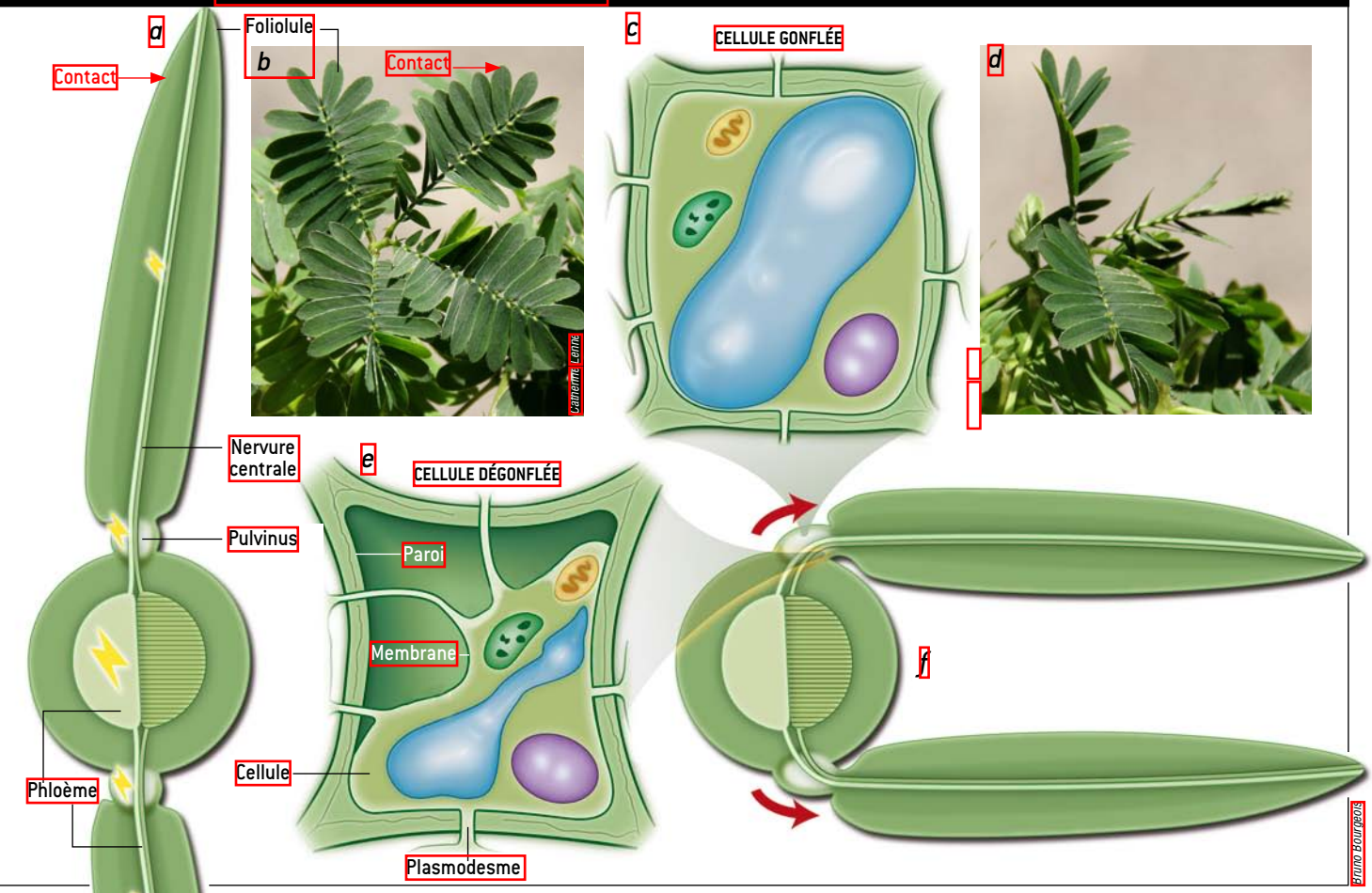
Comment les plantes exécutent-elles les mouvements observés ? Les mécanismes des mouvements rapides, tels ceux de la sensitive, sont connus depuis plusieurs décennies. Les cellules végétales sont remplies d'eau sous pression. Cette pression, dite de turgescence, atteint cinq à dix fois la pression atmosphérique (près de 100 fois plus que dans les cellules animales et deux à quatre fois plus que dans les pneumatiques des voitures). Elle résulte d'un phénomène d'osmose, c'est-à-dire d'une diffusion de l'eau à travers la membrane cellulaire du milieu le moins concentré en composés divers (l'extérieur de la cellule) vers le milieu le plus concentré (l'intérieur de la cellule). Quand on appuie sur une feuille de sensitive, on provoque l'ouverture de canaux ioniques mécanosensibles, des canaux membranaires qui s'ouvrent brièvement sous l'effet d'une tension de la membrane et qu'on trouve aussi chez les bactéries et les animaux. Cela entraîne une entrée d'ions (par ces canaux), puis d'eau par osmose, dans les cellules du pulvinus, un organe moteur situé à la base de la feuille. En conséquence, les cellules se déforment élastiquement, comme un ballon qui se gonfle. Lors du phénomène inverse, dit de plasmolyse, les cellules se vident et se dégonflent. Ainsi, le déploiement et le repliement des feuilles sont provoqués par les variations de volume des cellules situées à leur base, qui agissent comme un vérin hydraulique *(voir l'encadré ci-dessus)*.

Ce mécanisme moteur est dit hydro-osmotique et on le retrouve dans tous les

Quand on touche une feuille de sensitive *(b)*, elle se replie rapidement *(d)*. Le toucher provoque l'ouverture de canaux ioniques mécanosensibles et la propagation de signaux électriques *(a, éclairs jaunes)*. Des ions pénètrent alors dans les cellules de la face externe du pulvinus, à la base de la foliolule (une subdivision de la feuille). Cela entraîne une entrée d'eau par un phénomène d'osmose. En conséquence, les cellules se gonflent *(c)*. Sur la face interne du pulvinus, le phénomène inverse se produit et les cellules se dégonflent *(e)*. La foliolule touchée se replie en moins d'une seconde *(f)*.
Elle est ensuite imitée par les autres foliolules, voire par la feuille entière. Leur repliement est déclenché par les signaux électriques, qui se propagent dans le phloème (le tube conducteur de la sève élaborée, contenant les matières organiques). Certains traversent aussi les pulvinus. Ils passent d'une cellule à l'autre *via* les plasmodesmes (des tunnels dans les parois cellulaires). Quand ils atteignent un pulvinus, ils provoquent l'ouverture de canaux ioniques dits voltage-dépendants, et là encore un gonflement par osmose se produit, à l'origine du repliement.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

LE RÉFLEXE DE LA SENSITIVE



mouvements réversibles. Ainsi, la plupart des mouvements dits de veille-sommeil (ceux des fleurs qui s'ouvrent le jour et se ferment la nuit) reposent sur le gonflement et le dégonflement réversibles des cellules de la base des pétales.

Les autres mouvements lents sont irréversibles. C'est le cas des plantes placées horizontalement, qui se redressent en un temps dépendant de leur taille : une dizaine d'heures pour une plante en germination (croissant encore en longueur), trois mois pour un petit arbre.

Chez les jeunes plantes herbacées et les arbres de moins d'un an, le redressement est dû à une croissance plus rapide d'un côté que de l'autre : le végétal se courbe alors dans la direction de moindre expansion. Le moteur de la croissance est aussi la pression hydrostatique d'origine osmotique : grâce à des pompes ioniques (qui consomment de l'énergie pour transporter des ions à travers la membrane cellulaire) et divers autres mécanismes, la concentration des cellules en certains composés change, ce qui modifie la pression hydrostatique interne par osmose ; on parle d'osmorégulation.

Mais contrairement au mouvement de la sensitive, les parois cellulaires se ramollissent, et ce de façon contrôlée. Seul un côté de la cellule s'assouplit, d'où un allongement directionnel. Après cette phase, les parois durcissent à nouveau. Lorsqu'une jeune plante placée à l'horizontale se redresse, la croissance inférieure du côté concave est due à un plus faible ramollissement des parois cellulaires de ce côté.

Dans le cas d'un arbre mature poussant dans une pente, dont le tronc s'arque lentement par la base pour retrouver la verticale, le moteur ne peut être identique. D'une part, les forces hydro-osmotiques ne sont pas assez puissantes ; d'autre part, la taille des cellules ne varie plus à la base du tronc. Dans cette zone, seule une croissance dite secondaire se déroule encore, c'est-à-dire une production de bois provoquant l'épaississement. Le bois est formé de plusieurs types cellulaires et comprend notamment des fibres, constituées de cellules mortes aux parois épaissies et collées les unes aux autres, qui augmentent sa rigidité. Le redressement est provoqué par la fabrication d'un bois spécial, dit de tension, dont les fibres se rétractent peu à peu. Comme il ne se dépose que d'un côté, il forme une sorte de hauban interne, qui entraîne la flexion de l'arbre.

La plupart des mouvements végétaux résultent de tels phénomènes de croissance contrôlée. Certains chercheurs vont jusqu'à considérer la croissance en hauteur comme une forme de motricité, dirigée vers le haut. Or les plantes croissent toute leur vie (en longueur au sommet des tiges, des branches et des racines, et en épaisseur ailleurs), d'où des capacités motrices permanentes. Celles-ci sont assurées par les mêmes tissus qui servent à la rigidité. Il n'y a donc pas

de distinction entre squelette et « muscle », ni entre croissance et mouvement.

Comment les différents signaux sont-ils perçus et de quelle façon agissent-ils sur les moteurs des mouvements ? Nous l'avons vu, quand on appuie sur une feuille de sensitive, on provoque l'ouverture de canaux ioniques mécanosensibles. Cependant, la réaction de la plante ne se limite pas à cette transformation mécanique du stimulus et met en jeu une sensibilité complexe.

De la sensibilité à la motricité

Cette idée avait été ébauchée par Claude Bernard, le père de la méthode expérimentale en physiologie. En 1878, il a « endormi » une sensitive avec une éponge imbibée d'éther. Pour des raisons encore mal comprises, les feuilles de la plante ainsi traitées ne bougent plus quand on les touche. Bernard en a conclu qu'à l'instar des tissus animaux, les plantes ont une « irritabilité », définie comme « la propriété de réagir d'une certaine manière sous l'influence des excitants extérieurs », et que l'irritabilité végétale et la sensibilité animale ne diffèrent qu'en degré. Il considérait que la première était une forme élémentaire de la seconde, même si celle-ci, contrairement à l'irritabilité végétale, peut impliquer une perception consciente.

LES AUTEURS

Catherine LENNE est maître de conférences en botanique à l'Université Blaise Pascal.

Olivier BODEAU est doctorant à l'IHPST (Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques), à Paris.

Bruno MOULIA dirige l'équipe Mécanobiologie des plantes de l'Université Blaise Pascal et de l'INRA, à Clermont-Ferrand.

Les feuilles de la sensitive sont divisées en folioles, elles-mêmes scindées en foliolules. Or la foliolule touchée n'est pas la seule à se replier : elles le font toutes, l'une après l'autre, en partant de celle qui a été touchée. Un signal se propage donc rapidement dans la feuille. Ce signal, qui déclenche la turgescence (le gonflement) et la plasmolyse (le dégonflement) des cellules, est de nature électrique. Les expériences du biologiste indien Jagadish Chandra Bose l'ont montré dès les années 1900. Au repos, la membrane cellulaire est polarisée négativement, c'est-à-dire que le potentiel électrique intracellulaire est inférieur au potentiel extracellulaire, en raison de différences de concentration ionique. Quand on stimule une foliolule, des électrodes placées sur le pétiole de la feuille (la partie qui la connecte à la tige) enregistrent une réponse comparable au potentiel d'action d'un neurone : le potentiel électrique augmente brièvement, puis redescend au-dessous de sa valeur initiale, avant de revenir à la normale.

Les cellules végétales transmettent donc des signaux électriques comparables aux influx nerveux des animaux – bien que la plante ne possède pas de nerfs. Ces signaux se propageraient dans le pulvinus et dans le phloème, le tissu conducteur de la sève élaborée (la sève qui contient la matière organique synthétisée par les feuilles), en partie constitué de cellules vivantes. Comme dans

La lente remontée des plantes sur l'échelle du vivant

Depuis la naissance de la physiologie en Grèce antique, on distingue la vie métabolique, qui assure les fonctions de nutrition et de croissance, et la vie « de relation », où l'organisme interagit avec l'environnement grâce à des organes sensoriels et moteurs. Les végétaux n'auraient accès qu'à la première. On parle ainsi de vie végétative pour décrire le fonctionnement automatique des poumons, de l'estomac, des intestins… L'appareil nerveux qui en règle le fonctionnement est aussi qualifié de végétatif. Sur cette sorte de tronc commun aux végétaux et aux animaux, nos organes sensoriels et moteurs ajouteraient une enveloppe animale.

Cette représentation des plantes comme des organismes passifs remonte au moins à Aristote. Dans son traité *De l'âme*, le philosophe grec leur reconnaissait pourtant une faculté à se mouvoir (leur croissance était assimilée à un mouvement), mais non couplée à la capacité de sentir. Il distinguait différentes âmes dans la nature (l'âme étant entendue comme ce qui anime la matière d'un organisme) : l'âme nutritive, la plus basse, qui permet aux êtres vivants de se reproduire, de croître et de se nourrir ; l'âme sensitive, qui confère le pouvoir de sentir les propriétés du monde environnant ; et enfin, l'âme rationnelle ou intellective, qui préside à la pensée. Selon Aristote, les végétaux n'ont que la première, tandis que les animaux possèdent aussi la deuxième et que les trois réunies sont l'apanage de l'homme. Dès l'Antiquité, les végétaux sont ainsi placés tout en bas de l'échelle. Cette conception aura la vie longue. En 1753, Buffon compare le végétal à « un animal qui dort » et, en 1800, le physiologiste Bichat formule la même idée : « On dirait que le végétal est l'ébauche, le canevas de l'animal, et que, pour former ce dernier, il n'a fallu que revêtir ce canevas d'un appareil d'organes extérieurs, propres à établir des relations ». La notion moderne de vie végétative radicalisera ce modèle, faisant de la sensorimotricité la ligne de rupture entre l'animal et le végétal.

Cette idée n'a commencé à être remise en cause qu'au milieu du XIXe siècle, par les Darwin (le biologiste Charles, père de la théorie de l'évolution, et son fils Francis, un botaniste) et par les physiologistes allemands des végétaux, en particulier Wilhem Pfeffer et Julius von Sachs. Ils ont mis en évidence une certaine réactivité des plantes aux perturbations extérieures. Les recherches ultérieures ont amplifié leurs découvertes et révélé chez les plantes une sensorimotricité riche et originale, dont on commence juste à apercevoir l'ampleur. Elles ont permis de dépasser un double obstacle épistémologique, d'origine anthropomorphique. Tout d'abord, croissance et mouvement nous semblent des processus séparés, de vitesses différentes, mais chez les plantes, ils se confondent : la croissance est le moteur de la motricité. En outre, la sensorimotricité animale est fondée sur des organes dédiés et localisés (les yeux, les mains, les muscles, etc.), tandis que chez les plantes, elle est plus répartie. C'est pourquoi sa mise en évidence a été moins immédiate.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

de nombreux tissus végétaux, les cellules y partagent la même membrane plasmique : elles communiquent par des plasmodesmes, sortes de tunnels creusés dans les parois (le matériau composite à base de cellulose et de gel pectique qui entoure les cellules végétales, en plus de la membrane). Les signaux électriques se propageraient le long de cette membrane commune. Ainsi, le phloème constituerait une sorte de grand axone (les prolongements neuronaux qui forment les fibres nerveuses chez les animaux).

Les signaux électriques se propagent bien moins vite le long de la nervure d'une feuille que dans un axone (un à cinq centimètres par seconde, contre plusieurs dizaines de mètres par seconde). Comme chez les animaux, ils résultent de multiples échanges ioniques à travers la membrane, déclenchés par les canaux mécanosensibles et amplifiés puis propagés par des canaux dits voltage-dépendants (qui s'ouvrent et se ferment en fonction de la différence de potentiel de part et d'autre de la membrane). Chez les animaux, l'influx nerveux passe d'un neurone à l'autre en franchissant une synapse, grâce à des molécules nommées neurotransmetteurs. Les synapses sont « plastiques », c'est-à-dire que leurs caractéristiques peuvent évoluer, une propriété essentielle à l'apprentissage et au traitement de l'information. On ne connaît pas à ce jour d'équivalents végétaux des synapses, mais des molécules chimiquement proches des neurotransmetteurs sont produites par les plantes (tel le GABA, un neurotransmetteur inhibiteur).

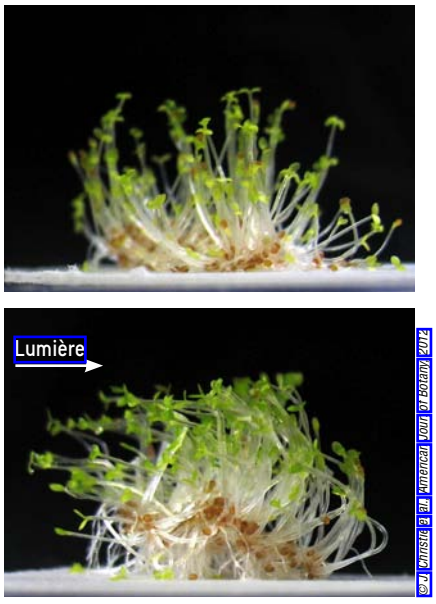
Des synapses végétales ?

Plusieurs équipes recherchent de telles « synapses végétales ». Celles-ci pourraient se situer par exemple au niveau des plasmodesmes du phloème (bien que la membrane soit continue, l'intérieur du plasmodesme contient des structures protéiques complexes, susceptibles d'être modifiées par le passage du signal électrique). En 2013, l'équipe d'Ed Spalding, de l'Université du Wisconsin, a montré que dans les racines de l'arabette des dames, le voisinage de ces tunnels cellulaires contient des récepteurs du glutamate (un autre neurotransmetteur animal) voisins des nôtres.

Quoi qu'il en soit, l'existence de signaux électriques n'est pas limitée aux feuilles de la sensitive. Plusieurs équipes en ont aussi observé dans d'autres organes, sur des plantes différentes. Ainsi, en 2009, Elisa Masi, de l'Université de Florence, et ses collègues ont mesuré une activité électrochimique intense et temporellement organisée dans les racines de maïs. Les signaux sont déclenchés par de multiples stimulus, telle la rencontre d'un caillou ou d'un composé chimique particulier. Leur rôle est pour l'instant moins bien compris que chez la sensitive, mais les travaux récents montrent qu'ils sont aussi impliqués dans la régulation des mouvements lents et irréversibles liés à la croissance. Ils semblent là encore circuler dans les cellules du réseau phloémien, qui assurerait donc à la fois une fonction « vasculaire » (transport des sucres et des acides aminés) et une fonction « neurale ». Une même structure pour deux fonctions : l'évolution végétale est économe.

Les signaux électrochimiques du phloème ne sont pas les seuls utilisés dans le contrôle des mouvements. Prenons le cas d'une lumière latérale, qui a pour effet de courber les tiges vers la source lumineuse. La zone de perception de la lumière se situe au sommet de la tige et la zone de réaction, où les cellules s'allongent, plus bas. Entre les deux zones circule un signal de nature chimique, identifié depuis les années 1920 : il s'agit d'une hormone de croissance, l'auxine. Selon le modèle de Cholodny-Went (du nom des deux biologistes qui l'ont proposé de façon indépendante en 1927 et 1928, le Russe Nikolai Cholodny et le Néerlandais Frits Went), l'éclairement anisotrope de la tige provoque une redistribution latérale d'auxine vers la face ombrée. La concentration de l'hormone augmente sur cette face et y stimule l'allongement des cellules. La croissance différentielle qui en résulte produit la courbure.

Par quel mécanisme une lumière anisotrope déclenche-t-elle la redistribution latérale de l'auxine ? Sous un éclairage homogène, l'hormone, synthétisée au sommet des tiges, circule vers le bas de la plante. Le transport a lieu de cellule en cellule, dans les tissus vivants des nervures (les cellules qui entourent les vaisseaux de transport de la sève) ou dans l'épiderme. Des protéines membranaires spécialisées, les transporteurs d'auxine, assurent la traversée des membranes cellulaires. Celles qui pompent l'hormone hors des cellules ne sont localisées que sur leur face inférieure, ce qui explique que l'auxine ne circule que vers le bas. Une expérience simple confirme que ce sont bien ces protéines, et non la



2. LORS D'UN PHOTOTROPISME, les plantes se courbent lentement vers une source lumineuse. Comme la plupart des mouvements végétaux, cet effet résulte d'un phénomène de croissance différentielle : la face éclairée de la tige pousse moins vite que la face opposée, d'où une courbure dirigée vers la source.

BIBLIOGRAPHIE

D. Chamovitz, **La plante et ses sens,** Buchet-Chastel, 2014.

A. Barbacci *et al.*, **A robust videogrametric method for the velocimetry of wind-induced motion in trees,** *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 184, pp. 220-229, 2014.

R. Bastien *et al.*, **A unifying model of shoot gravitropism reveals proprioception as a central feature of posture control in plant,** *PNAS*, vol. 110, pp. 755-760, 2013.

Advances in plant tropisms, *American Journal of Botany*, vol. 100, n°1, janvier 2013.

Les végétaux insolites, *Dossier Pour la Science*, n°77, 2012.

P. Pellegrin, **Aristote,** *Les Génies de la Science*, n° 25, 2005.

pesanteur, qui polarisent la circulation de l'hormone : quand on retourne la plante, l'auxine circule vers le haut.

Lors de la réponse phototropique, la lumière agit sur des pigments solubles, les phototropines, dont elle provoque la phosphorylation (l'ajout d'un groupe phosphate). Cela déclenche, par un mécanisme qui reste à préciser, la relocalisation des transporteurs membranaires d'auxine sur les faces latérales des cellules, du côté opposé à la lumière. Dès lors, l'hormone se propage latéralement et s'accumule sur la face ombrée.

De même, des pigments photosensibles, les phytochromes, sont en cause dans la perception des plantes voisines évoquée précédemment. Ces pigments influent sur l'expression du génome d'une façon qui dépend de leur configuration tridimensionnelle. Or cette configuration varie selon les longueurs d'onde reçues. Il en résulterait une modulation de l'expression du génome, qui modifierait la croissance.

Dans les autres tropismes, l'auxine semble jouer un rôle : dans une racine placée à l'horizontale, par exemple, la croissance différentielle des deux faces qui entraîne la courbure vers le bas est aussi liée à une redistribution latérale de l'hormone. Celle-ci s'accumule sur la face inférieure, dont elle inhibe l'allongement. L'effet est inversé par rapport à la tige, car il dépend de la concentration d'auxine et de l'organe végétal (tige ou racine) : l'hormone stimule la croissance au-dessous d'une concentration critique et l'inhibe au dessus. Or cette concentration critique est, dans la racine, 10 000 fois inférieure à celle de la tige. Comme dans le phototropisme, la redistribution de l'hormone repose sur la migration des transporteurs d'auxine. Les mécanismes qui provoquent cette migration restent à élucider, mais ils doivent être liés à la capacité des plantes à percevoir la verticale.

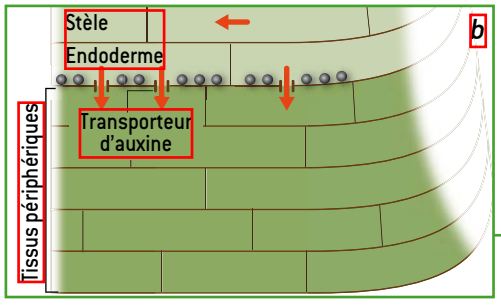
La gravité est perçue dans les pointes des racines, ainsi que dans les tissus périphériques des tiges chez les jeunes plantes herbacées et les rayons ligneux du bois chez les arbres. Dans les deux cas, des cellules spécialisées, nommées statocytes, contiennent des grains d'amidon, les statolithes, plus denses que le cytoplasme environnant. D'une taille de l'ordre du micromètre, ces grains se déposent sous l'action de la gravité sur le fond de la cellule. La plante dispose ainsi de petits « sabliers cellulaires » qui lui indiquent le sens de la gravité (la direction « bas »).

SENSIBILITÉ À LA PESANTEUR ET

Quand on incline une jeune pousse, elle se redresse peu à peu *(a, les positions successives d'une tige d'arabette des dames)*. Le phénomène est en partie dû à l'action de l'auxine, une hormone de croissance synthétisée au sommet de la plante et qui descend par son centre (la stèle et l'endoderme). Dans une tige verticale, l'auxine ne fait que descendre, car elle est pompée à travers les membranes par des « transporteurs » situés sur la face inférieure des cellules. L'inclinaison horizontale de la tige entraîne une relocalisation de ces pompes sur la face cellulaire latérale, maintenant orientée vers le bas *(b)*. L'hormone se concentre alors sur la face inférieure de la plante, qui pousse plus vite, d'où la courbure vers le haut. La relocalisation des transporteurs d'auxine serait provoquée par des statocytes, des grains d'amidon qui pèsent sur le fond des cellules et sont donc à l'origine de la sensibilité de la plante à la pesanteur.

Cependant, quand on simule le redressement de la plante en supposant qu'il n'est piloté que par cette sensibilité, on constate qu'elle oscille autour de la position verticale *(c, les positions successives de la tige)*. Pour que la simulation reproduise la rectitude observée dans la nature *(d)*, il faut supposer que chaque cellule perçoit sa déformation et réagit de façon à minimiser la courbure, c'est-à-dire que la plante est dotée d'une proprioception.

DANS UNE TIGE INCLINÉE, l'auxine venue du sommet s'accumule sur le côté inférieur *(dans la demi-tige ci-contre, sa concentration est d'autant plus élevée que le vert est foncé)*. En effet, elle est pompée à travers les membranes *(flèches rouges)* par des transporteurs, qui se relocalisent sur la face latérale des cellules suite à l'action de statocytes *(grains noirs)* dans l'endoderme.



Ce mécanisme présente une certaine ressemblance avec notre propre système de perception de la gravité. Chez l'homme, de petites concrétions minérales de carbonate de calcium, aussi nommées statolithes (ou otolithes), sont inclus dans le liquide visqueux des canaux de l'oreille interne. Elles pèsent sur des cellules ciliées excitables, qui créent un signal électrique. Transmis au cerveau, ces signaux le renseignent sur la position du corps dans l'espace.

Des perceptions coordonnées

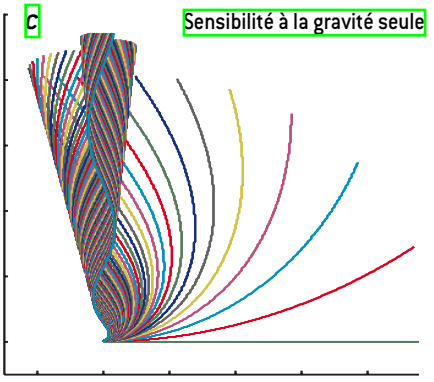
Chez les plantes, on pense que le poids des statolithes sur le fond des cellules, ainsi que celui de la cellule appuyant sur la paroi qui l'entoure, provoquent l'ouverture de canaux mécanosensibles. En conséquence, des courants ioniques locaux sont créés lorsqu'on incline la tige ou la racine. Ces courants déclencheraient une série de réactions locales, qui aboutiraient à la redistribution des transporteurs d'auxine.

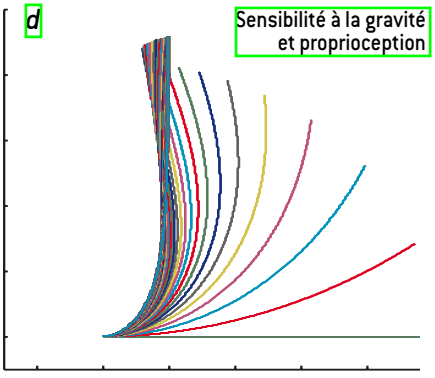
Cependant, l'un d'entre nous (B. Moulia), en collaboration avec Stéphane Douady, physicien au CNRS, et Renaud Bastien, alors doctorant à l'INRA, a montré que la sensibilité à la gravité ne suffit pas à expliquer les caractéristiques exactes du redressement gravitropique des tiges. Dans une étude publiée en 2013, ces chercheurs ont simulé ce redressement sur ordinateur, en supposant que le mouvement n'était piloté que par la perception de l'écart angulaire de la tige par rapport à la verticale. Le tronc oscillait alors autour de cette dernière, car chaque élément de tige essayait de se redresser indépendamment en entraînant les autres.

Pour obtenir l'alignement sur la direction de la gravité observé dans la nature, il faut supposer que la courbure est rectifiée en continu en tout point de la tige. Il doit donc exister un mécanisme correcteur qui permet à la plante de contrôler sa posture. Il s'agit d'un phénomène de proprioception, terme qui étymologiquement signifie « perception de la configuration géométrique du corps ». Il est comparable à celui rencontré chez les animaux et les humains, même s'il est fondé sur des mécanismes locaux et non sur un traitement nerveux central.

Après avoir incorporé une telle proprioception à leur modèle, les chercheurs ont simulé le redressement de 11 espèces de

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014





plantes à fleurs terrestres, qu'ils ont filmé et quantifié par ailleurs. Leur simulation a reproduit fidèlement le redressement de toutes les tiges, de la minuscule germination du blé aux troncs de peupliers. Ainsi, la coordination de millions de cellules motrices est possible par la combinaison d'une perception locale de l'inclinaison et de la déformation (la courbure) des cellules. C'est une nouvelle preuve que les plantes sont capables d'intégrer plusieurs signaux et ne se contentent pas d'une réponse réflexe déclenchée par un stimulus unique, comme on le pensait récemment encore.

Comment la courbure est-elle perçue et intégrée ? Pour le déterminer, B. Moulia et ses collègues ont réexaminé les travaux antérieurs où la modification de la courbure et la redistribution latérale de l'auxine étaient mesurées. Cette redistribution se révèle trop lente pour provoquer la modification de courbure observée. L'auxine ne semble donc pas intervenir dans la correction proprioceptive de la courbure, même si des travaux supplémentaires seront nécessaires pour le confirmer. Là encore, des canaux mécanosensibles pourraient être en cause.

Ainsi, les plantes réajustent leur posture en permanence, en réponse à plusieurs types de signaux, telles la lumière, la gravité et la déformation. L'ensemble des signaux perçus sont intégrés pour conduire à une coordination des mouvements. L'originalité de la sensitive n'est pas tant sa sensibilité ni sa motricité, mais sa rapidité, qui rend ses mouvements perceptibles. Les mécanismes de sensorimotricité se sont probablement développés lors de la colonisation de la terre ferme, permettant aux plantes de pousser vers le haut en l'absence d'un fluide porteur.

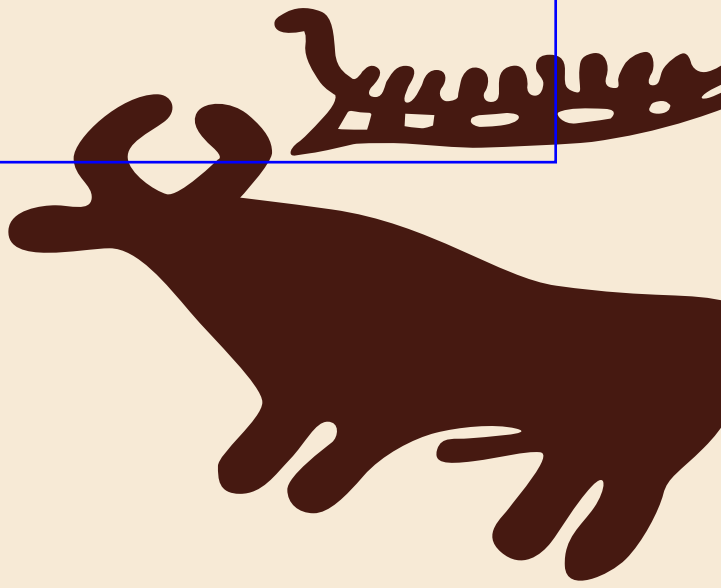
Des réseaux complexes

L'étude des mécanismes en jeu demande des analyses allant de l'échelle moléculaire à celle de la plante entière, et associant biologistes, mécaniciens et physiciens. On commence seulement à comprendre les réseaux de signalisation et de régulation impliqués dans la coordination des mouvements végétaux. En particulier, l'auxine semble jouer un rôle important pour traduire les perceptions en motricité et elle interagit avec d'autres signaux (courants ioniques, potentiels d'action, hormones).

Ces découvertes ont remis en cause nombre de nos repères épistémologiques et brouillé la frontière entre les plantes et les animaux. Certains chercheurs, comme Tony Trewavas, de l'Université d'Édimbourg, ou Francisek Baluska et Stephano Mancuso, de l'Université de Florence, envisagent ainsi un traitement complexe de l'information chez les végétaux, qui permettrait d'adapter le comportement moteur à la combinaison de signaux reçus de l'environnement. On parle de neurobiologie végétale, terme contesté, mais qui révèle le bouleversement de nos conceptions.

Soulignons pour terminer l'originalité et l'élégance des mécanismes développés par l'évolution végétale. La sensorimotricité des plantes est fondée sur un nombre restreint de structures. Les mêmes cellules assurent à la fois la fonction squelettique et la fonction motrice, et les « influx nerveux » sont transportés par la voie « vasculaire ». En outre, l'ensemble du corps de la plante est doué de sensorimotricité. De nombreuses zones d'ombre persistent dans les mécanismes en jeu. Nul doute que les recherches des années à venir seront passionnantes et permettront d'y voir un peu plus clair. ■

Les débuts européens de la production laitière



Mélanie Roffet-Salque et Richard Evershed

L'analyse biochimique de tessons de poterie a révélé comment la production laitière s'est mise en place dans l'Europe néolithique et a apporté la preuve que l'on fabriquait du fromage il y a au moins 7 500 ans.

Depuis des millénaires, partout où ils vont, les Européens élèvent des animaux dont ils consomment le lait. Il y a cinq siècles, ils posaient le pied en Amérique, et aujourd'hui, les États-Unis produisent 90 millions de tonnes de lait par an… tandis que l'Union européenne en produit 140 millions de tonnes, soit trois quarts de litre de lait par Européen et par jour. Cette immense collecte implique quelque 712 000 exploitations laitières comprenant de une à deux vaches, comme en Roumanie, à plus de 100, comme au Danemark. De fait, le lait est aujourd'hui la base d'une industrie européenne florissante, qui exporte une grande variété de produits laitiers dans le monde entier *(voir l'encadré page 50)*.

Quand et comment a débuté la production laitière en Europe ? De récentes découvertes archéologiques prouvent que les paysans qui, il y a huit millénaires, ont commencé à remonter le couloir danubien ou à se répandre dans les Balkans, poussaient devant eux des ruminants pourvoyeurs de viande et surtout de lait. Transformé en fromage, le lait représentait une précieuse réserve alimentaire, car facilement transportable et stockable.

L'ESSENTIEL

- **L'exploitation laitière était déjà intense en Anatolie au VIIIe millénaire avant que les premiers éleveurs ne s'aventurent en Europe.**
- **L'agropastoralisme et la production de lait qui l'accompagne se sont répandus en Europe en moins de 4 000 ans par deux voies : les côtes méditerranéennes et le couloir danubien.**
- **Il y a huit millénaires, les paysans néolithiques européens fabriquaient déjà du fromage dans des faisselles.**

© P.L.S. / Varden Wik, photographe, Ella Kaarlenga Bin Sweden

Une invention fortuite : le fromage

Lorsque les paysans ont migré vers l'Europe en provenance d'Anatolie (Turquie), ils savaient donc probablement transformer le lait. Comment l'ont-ils appris ? On ne peut que faire des hypothèses. Le fromage aurait été inventé fortuitement au Moyen-Orient. Héritières des savoir-faire des chasseurs-cueilleurs du Paléolithique, les populations de cette région transportaient probablement leurs denrées alimentaires dans des outres confectionnées avec les peaux et les viscères, l'estomac notamment, des animaux tués. Or l'estomac des jeunes ruminants contient de la présure, un coagulant naturel. La présence de cette substance dans le lait entraîne la séparation du petit-lait (la fraction maigre et liquide) et du caillé (la

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

fraction grasse et solide, qui est la base du fromage). Nos ancêtres auraient ainsi découvert le fromage après avoir stocké du lait dans une outre d'estomac, à moins qu'ils n'aient simplement constaté la présence de lait caillé dans l'estomac d'un jeune ruminant tué pour sa viande. Quoi qu'il en soit, ils ont appris d'une façon ou d'une autre à imiter la digestion du veau en ajoutant de la présure à du lait tout juste trait.

Le fromage, pâte plus ou moins liquide, molle ou solide, est en effet le résultat d'un caillage sous l'effet d'un coagulant, d'un moulage (« fromage » est d'ailleurs une déformation du mot « formage » qui désignait cette opération), puis d'un égouttage et, enfin, d'un affinage plus ou moins long *(voir la figure 3)*. Par ces opérations, on transforme un liquide nourricier difficile à manipuler et à stocker en une denrée stockable, transportable et, surtout, digeste.

C'est en effet grâce à cette propriété de digestibilité que le fromage constitue un moyen très efficace de stocker les protéines et les graisses produites par les animaux laitiers. La fabrication du fromage diminue la teneur en lactose, sucre qui reste dans le tube digestif, où sa digestion par des bactéries (fermentation) provoque chez 65 pour cent de la population adulte mondiale d'aujourd'hui ballonnements, crampes et diarrhées… Or le caillage, la séparation du caillé et l'égouttage évacuent la plus grande part du petit-lait, composante riche en lactose nommée aussi lactosérum.

Digérer le lactose

Le fromage était une aubaine pour les populations préhistoriques, car, comme de très nombreux adultes aujourd'hui, elles étaient probablement intolérantes au lactose. Le séquençage de l'ADN extrait de plusieurs ossements de premiers paysans européens a en effet révélé que ces individus ne synthétisaient pas à l'âge adulte la lactase, l'enzyme permettant de digérer le lactose. Et en 2009, une simulation numérique réalisée par Mark Thomas et son équipe à l'UCL *(University College London)* de l'évolution génétique de la

1. CE RELEVÉ D'UNE GRAVURE RUPESTRE DE L'ÂGE DU BRONZE, trouvée à Aspeberget en Suède, souligne l'importance des taureaux pour nos ancêtres paysans. Symboles de force, ils étaient utiles au travail de la terre. Quant aux vaches, lorsqu'elles avaient des veaux, elles produisaient du lait. Ce dernier servait à produire du fromage, que l'on pouvait stocker et transporter facilement, ce qui apportait une sécurité alimentaire essentielle.

L'industrie du lait est l'une des grandes richesses européennes. Ainsi, en 2011, le solde du commerce extérieur des produits alimentaires de l'Europe a été négatif de quelque 13 milliards d'euros, tandis qu'en même temps, ce solde pour les produits laitiers uniquement était positif de 7,5 milliards d'euros, après avoir augmenté de plus de 40 pour cent en cinq ans… Ainsi, dans la même année, les Européens ont exporté pour plus de 8,1 milliards d'euros de produits laitiers, alors qu'ils n'en importaient que 0,6 milliard.
En 2011, le Vieux Continent a exporté 4,1 millions de tonnes de fromage, et la France 0,7 million de tonnes. Très divers, les produits laitiers, sous forme de yaourts, de desserts, de beurre, de crème, etc., valent à l'Europe dix des 25 plus grands transformateurs de lait au monde, dont cinq sont français, parmi lesquels *Danone* et *Lactalis* sont les 2e et 3e.

population de ces pasteurs a montré que la version du gène (l'allèle) associé à cette synthèse s'est beaucoup répandue dans la population européenne.

De fait, plus de 90 pour cent des adultes de l'Europe septentrionale d'aujourd'hui sont tolérants au lactose (ils synthétisent la lactase), et 50 pour cent en Europe méditerranéenne ; pour comparaison, 90 pour cent des Chinois ou des Africains subsahariens ne le sont pas… Ainsi, il semble bien que depuis l'arrivée des premiers paysans en Europe, une sélection positive ait augmenté la fréquence de l'allèle responsable de la tolérance des adultes au lactose au sein de la population européenne.

Quand dans la préhistoire européenne a commencé l'exploitation laitière ? Elle a vraisemblablement débuté avec l'élevage, donc au Néolithique. Ce « nouvel âge de la pierre » correspond au passage progressif d'une subsistance fondée sur la prédation (chasse, pêche, cueillette) à une subsistance fondée sur la production. Le Néolithique a démarré au Proche-Orient par une phase de cueillette-stockage des graminées sauvages et s'est poursuivi par la mise en culture et la domestication de certaines plantes, ainsi que, plus tard, par la domestication des ongulés.

Cette domestication s'est produite au Proche-Orient dès le VIIIe millénaire avant notre ère, plusieurs siècles après le début de l'agriculture. Les cheptels comprenaient des vaches, des moutons, des chèvres et des porcs.

Un pas décisif vers l'émergence d'une société agropastorale organisée a été l'apparition des céramiques, dès 7200 avant notre ère, dans des communautés du Proche-Orient déjà sédentarisées, vivant dans des habitations circulaires ou semi-circulaires.

En Europe, l'agropastoralisme sera introduit entre 6800 et 5000 avant notre ère, sauf dans les marges septentrionales du continent. Auparavant, il est longtemps resté confiné en Anatolie sud-occidentale et en Grèce. Puis, entre 6100 et 5800 avant notre ère, les paysans ont commencé à coloniser l'Europe par deux voies : le couloir danubien d'une part, les Balkans et la Méditerranée d'autre part. Entre 5800 et 5500 avant notre ère, des groupes agropastoraux progressent dans les Carpates et s'installent sur les côtes de la Méditerranée occidentale centrale. Par exemple, en Corse, les premiers paysans ont mis le pied sur cette île au début du VIe millénaire avant notre ère.

L'industrie laitière néolithique a d'abord été étudiée par l'archéozoologie.

Dans le même temps, des paysans pratiquant l'agropastoralisme remontaient le couloir danubien. Vers 5500 avant notre ère, ils sont parvenus au Rhin, s'y sont arrêtés un moment, puis se sont répandus dans le Nord de la France, où ils ont fini par entrer en contact avec les groupes méditerranéens. On peut considérer que la néolithisation de l'Europe continentale s'est achevée vers 5000 avant notre ère. En France, elle a produit la première culture issue du contact entre les courants danubiens et méditerranéens de la néolithisation : la culture chasséenne (de 4200 à 3500 avant notre ère).

L'industrie laitière néolithique, une composante importante de ces sociétés, a d'abord été étudiée par l'archéozoologie, c'est-à-dire par l'étude systématique des ossements animaux retrouvés sur les sites archéologiques. En effet, pour disposer de lait de façon durable, il ne suffit pas de posséder un cheptel d'ongulés et d'y traire les femelles allaitantes. Il faut aussi abattre certaines bêtes (veaux après sevrage et vaches de réforme, très jeunes agneaux et chevreaux mâles, etc.) pour maintenir la production de lait, tout en gardant un troupeau viable. Ces stratégies d'abattage peuvent être reconstituées à partir de l'âge et éventuellement du sexe des animaux dont on retrouve les ossements.

Dans des travaux publiés en 2007, les archéozoologues Jean-Denis Vigne et Daniel Helmer, du CNRS, ont par exemple étudié pour le Proche-Orient et l'Europe méditerranéenne 36 « profils d'abattage » pour les moutons et les chèvres et 17 pour les bovins. Ils ont ainsi montré que l'exploita-

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

EN CHIFFRES

LA VACHE EN EUROPE ET EN FRANCE

148,4 millions de tonnes
de lait de vache produites chaque année en Europe

24,5 millions de tonnes
de lait de vache produites chaque année en France

35 millions de vaches dans l'Union européenne

7,8 millions de vaches en France

6 616 litres de lait par vache
et par an en moyenne dans l'Union européenne

669 000 exploitations laitières
dans l'Union européenne

75 000 exploitations laitières en France

© Eric Isselee/shutterstock

tion laitière des caprinés, voire des bovins, était en place dans ces deux régions dès le début du Néolithique.

L'autre façon d'étudier les débuts de l'industrie laitière consiste à se concentrer sur les récipients néolithiques. L'élaboration des repas, le stockage du lait et la préparation des produits laitiers ont lieu dans des récipients étanches. Il a pu s'agir d'abord de contenants fabriqués à partir de matières organiques, tels le bois ou la peau. Les outres d'aujourd'hui, dont on fait encore des gourdes, en sont sans doute de lointaines descendantes. Ainsi, en Turquie, il est encore de tradition de pratiquer dans une peau de chèvre le barattage, c'est-à-dire la transformation de la crème de lait en beurre.

Analyser les tessons de poterie

Toutefois, les matières organiques finissent par se dégrader et disparaître, de sorte qu'il est bien plus efficace pour les archéologues d'étudier des contenants qui traversent le temps : les poteries.

Les archéologues découvrent constamment des poteries néolithiques, et, pour qui sait les faire parler, elles sont très utiles. Les paysans qui ont colonisé l'Europe n'ayant cessé de faire évoluer leurs céramiques, ces poteries servent en effet de marqueurs culturels et chronologiques. C'est d'ailleurs pourquoi le Néolithique européen est jalonné de cultures nommées d'après l'ornementation de leurs poteries, tels le Rubané (céramiques ornées de rubans), le Cardial (céramiques ornées d'impression de coquillage du genre *Cardium*), la culture de la céramique cordée, le campaniforme (céramique en forme de cloche), etc.

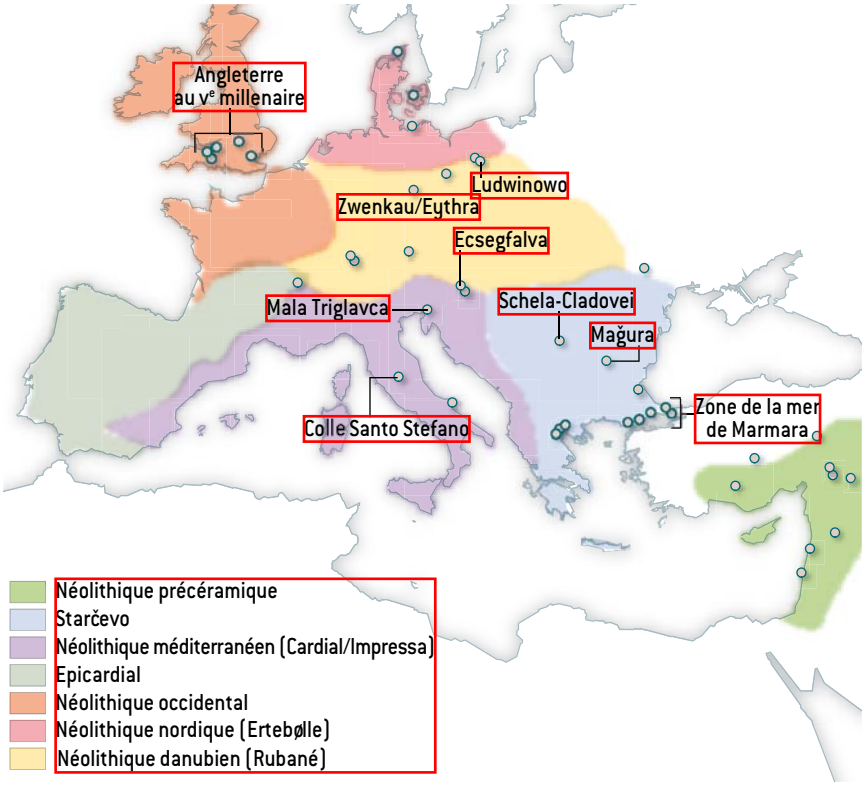
Par ailleurs, ces contenants anciens, ou ce qu'il en reste, c'est-à-dire la plupart du temps des tessons, racontent aussi ce qu'ils ont servi à cuire. En effet, les céramiques anciennes sont poreuses (parce que non-glaçurées), de sorte que lors de la cuisson, elles emprisonnaient et protégeaient les corps gras provenant des denrées alimentaires. Les graisses hydrophobes flottent en effet à la surface de l'eau de cuisson et pénètrent de façon privilégiée dans les pores de la partie supérieure du récipient. En focalisant les analyses sur les tessons de bords, on augmente ainsi les chances de détecter des lipides.

Comment procède-t-on ? Après avoir nettoyé la surface du tesson afin d'enlever d'éventuelles contaminations par le sol ou la main de l'archéologue, on le réduit en poudre. Les éventuels lipides sont ensuite extraits à l'aide de solvants organiques, puis traités pour être analysés par chromatographie et spectrométrie.

Ces techniques permettent de détecter des biomarqueurs, c'est-à-dire des molécules qui trahissent la présence ancienne de substances organiques complexes telles que résines, goudrons, cires, graisses végétales, graisses animales… Le lait dégradé est ainsi caractérisé par la présence d'acides gras, provenant de sa matière grasse.

Détecter les acides gras

Ces molécules, rappelons-le, sont des chaînes carbonées comportant une fonction carboxylique (–COOH) impliquant le premier atome de carbone de la chaîne ; on les note $C_{n:x}$, où n représente le nombre d'atomes de carbone de la chaîne et x le nombre de doubles liaisons. Or toutes les graisses animales (qu'elles soient de lait ou de viande) sont constituées majoritairement de triglycérides, de grandes molécules résultant de la fixation de trois acides gras sur un glycérol (composé de formule $HOH_2C\text{-}CHOH\text{-}CH_2OH$). La décomposition des triglycérides par hydrolyse (par l'eau) détache du glycérol les acides gras. La détection de ces derniers dans une poterie signale donc la présence passée de graisse animale.



2. LES SITES ARCHÉOLOGIQUES NÉOLITHIQUES, dont des tessons ont été analysés afin de détecter la présence de résidus laitiers, sont indiqués ci-dessus dans les grandes aires culturelles qui leur correspondent. Ils jalonnent la néolithisation de l'Europe, transition vers une économie de production qui a débuté il y a environ 8 000 ans près du Bosphore.

3. LA FABRICATION DU FROMAGE implique cinq étapes simples, maîtrisées probablement dès le Néolithique. Le caillage *(a)*, consiste à solidifier le lait à l'aide d'un agent coagulant : la présure. Le moulage et l'égouttage *(b, c)* consistent à placer le caillé obtenu dans un moule percé – la faisselle –, de façon à ce qu'il prenne sa forme et perde son reste de petit-lait. Après un long égouttage et le démoulage du fromage, le salage *(d)* peut se faire à la main, où par trempage. Finalement, dans la phase d'affinage, le fromage frais finira de sécher sur étagère dans des conditions choisies pour faire évoluer son goût *(d)*.

Deux acides gras sont toujours présents dans les graisses animales : l'acide palmitique (C16 : 0) et l'acide stéarique (C18 : 0). Ces composés n'étant pas caractéristiques, leur présence ne suffit pas à déterminer la nature de la graisse animale dont ils sont issus. Cependant, dans de rares cas (notamment en milieu lacustre) où les graisses animales présentes dans les résidus archéologiques sont bien préservées, la présence de triglycérides permet parfois de distinguer des graisses de lait de graisses de viande.

À la fin des années 1990, l'un d'entre nous (R. Evershed) et son équipe, à l'Université de Bristol, ont mis au point une méthode pour identifier la nature d'une graisse animale même si elle est très dégradée. Elle se fonde sur le fait qu'au sein de toute substance organique, le rapport entre les quantités de carbone 13 et de carbone 12 (c'est-à-dire le rapport $^{13}C/^{12}C$) reste constant dans le temps, puisque ces isotopes du carbone sont stables. Les différentes valeurs que prend ce rapport – ou une grandeur liée et notée $\delta^{13}C$ – dans des milieux organiques différents doivent donc se retrouver dans l'assemblage chimique produit par leur dégradation.

Pour valider cette approche, les chercheurs ont analysé des graisses provenant de lait et de viande échantillonnés sur des animaux élevés de façon traditionnelle dans le Sud de la Grande-Bretagne. Ils ont mesuré les valeurs du rapport $\delta^{13}C$ des deux acides gras $C_{16:0}$ et $C_{18:0}$ au sein de diverses graisses animales provenant de ces animaux. Ces valeurs varient. Ce phénomène s'explique à la fois par les différences de métabolisme entre un ruminant et un non-ruminant, et par le fait que la voie de synthèse de l'acide stéarique diffère selon qu'il s'agit de lait ou de viande.

Identifier les graisses animales dégradées

À partir de ces expériences sur des graisses actuelles, l'équipe de R. Evershed a prouvé qu'il est possible de distinguer, par les valeurs du $\delta^{13}C$ des acides palmitique et stéarique, les résidus de graisses de ruminants de ceux des non-ruminants, et les résidus des laits de ceux des viandes. Les chercheurs ont alors pu définir un protocole systématique d'identification des graisses animales dégradées présentes dans des pièces archéologiques, méthode qui s'applique en principe à tous les corps gras animaux contenus dans les tessons archéologiques.

L'équipe de R. Evershed a lancé ensuite une vaste campagne d'analyse de poteries provenant du Proche-Orient pour savoir si l'exploitation laitière a débuté dans le berceau de la domestication des animaux ou si cette innovation a été mise en place dans d'autres régions.

Les chercheurs ont recherché des résidus laitiers dans plus de 2 200 tessons de poteries provenant de 23 sites datés entre le VII^{e} et le V^{e} millénaire. De tels résidus ont été détectés en grandes quantités dans tous les sites du Nord-Ouest de l'Anatolie datant d'entre 6500 et 5000 avant notre ère : plus de 70 pour cent des graisses animales extraites des tessons se sont révélés d'origine laitière. Le lait a donc été intensément exploité autour de la mer de Marmara (entre l'Europe et l'Asie mineure) à cette époque. Or les sites ayant livré le plus de résidus laitiers sont aussi les sites où les ossements bovins sont les plus nombreux. Cela confirme le lien entre présence de bovins et production laitière sur ces sites.

Le lait a aussi été exploité ailleurs, au centre de l'Anatolie, au Sud-Est de l'Europe, dans l'Est de l'Anatolie et au Levant, mais pas avec la même intensité. En revanche, cela ne semble pas avoir été le cas en Grèce, pratiquement aucun des tessons grecs de

© a.c.d. | Pacom/shutterstock.com | Ola Speier/shutterstock.com

cette époque ne contenant de résidus laitiers. Il ressort donc de ces recherches que le lait a été exploité au Proche-Orient dès l'apparition de la céramique, donc un à deux millénaires plus tôt qu'on ne le pensait. Par ailleurs, même si des variations sont observables d'une région à l'autre du Nord-Ouest de l'Anatolie, il est évident que l'exploitation laitière y a été particulièrement intense. Sur ce plan, la partie de l'Anatolie proche de la mer de Marmara semble avoir été le point de départ de la vague de néolithisation de l'Europe.

De l'Anatolie à l'Europe

Que s'est-il passé une fois cette vague lancée ? L'industrie laitière a d'abord suivi le courant de néolithisation méditerranéen, parvenant par exemple en Italie centrale dès la première moitié du VI^e millénaire. Nous avons en effet constaté sa présence en étudiant des tessons provenant de l'habitat néolithique de Colle Santo Stefano, dans l'Aquila *(voir la figure 2)*, daté entre 5840 et 5460 avant notre ère, où des os de petits ruminants (moutons et chèvres) dominent dans les vestiges de la faune.

Toutefois, peu d'études de résidus lipidiques portant sur les sites néolithiques méditerranéens ont été publiées à ce jour. Les travaux de Martine Regert, du CEPAM à Nice, ont clairement établi l'importance des pratiques laitières dans les sites lacustres alpins au cours du IV^e millénaire, donc du Néolithique moyen et récent, là où les deux voies de la néolithisation européenne se confondent. Malheureusement, il n'existe à ce jour aucune donnée concernant le Néolithique ancien dans ces régions.

La vague de néolithisation a par ailleurs suivi le couloir danubien. Ainsi, les analyses de tessons prélevés en remontant le Danube – donc en descendant le courant de néolithisation danubien – ont montré que le lait était exploité dès le début du VI^e millénaire *(voir la figure 2)*.

Ainsi, Oliver Craig, de l'Université de York, et ses collègues ont montré que le lait était exploité à Schela Cladovei, un site néolithique datant d'entre 5950 et 5500 avant notre ère ; R. Evershed et des collègues ont découvert que c'était aussi le cas à Măgura entre 5500 et 5200 avant notre ère, puis, entre 5800 et 5700 avant notre ère, dans deux sites de la partie intermédiaire du bassin danubien : Ecsegfalva (Hongrie) et Mala Triglavca (Slovénie).

L'industrie laitière est ensuite parvenue au Nord du couloir danubien, puisque nos analyses de tessons datés entre 5200 et 4800 avant notre ère provenant du site de la culture du Rubané (5500-5000) de Ludwinowo (Pologne) atteste aussi la présence de résidus laitiers *(voir les figures 2 et 4)*.

Une fois parvenue tout au bout du couloir danubien, la vague de néolithisation s'est poursuivie d'une part vers la mer et la Grande-Bretagne, d'autre part vers la Scandinavie. Nos collègues scandinaves ont ainsi mené des recherches sur les évolutions culinaires durant la transition entre le Mésolithique et le Néolithique, lorsque des plantes et des animaux domestiqués ont été introduits pour la première fois dans la région. Des tessons de poterie de la culture Ertebølle (5300-4200) provenant à la fois de sites côtiers et de l'intérieur des terres ont été analysés et des résidus laitiers y ont été détectés. Or ces sites sont antérieurs d'au moins 600 ans au développement en Scandinavie du pastoralisme et de l'agriculture sous la forme de la culture des vases à entonnoir (4200 à 2600 avant notre ère).

En Grande-Bretagne, l'étude par des chercheurs de l'Université de Bristol de près de 2 000 tessons provenant de sites du Sud de l'île, datant du Néolithique à l'âge du Fer, a montré que le lait a été exploité de manière intensive depuis les prémices du Néolithique. Cela a permis aux populations préhistoriques de renoncer aux produits marins à la fin du V^e millénaire. Dans certains sites du Néolithique ancien britannique, jusqu'à 80 pour cent des tessons retrouvés contiennent des résidus laitiers !

Deux voies d'expansion

Résumons. Dès la seconde moitié du VII^e millénaire, une intense exploitation laitière s'est mise en place dans le Nord-Ouest de l'Anatolie, autour de la mer de Marmara, une région pourtant distante de la zone où ont été domestiqués les animaux laitiers. À partir de là, la production laitière a accompagné la vague de la néolithisation par deux voies, l'une danubienne et l'autre méditerranéenne, et cela jusqu'à la Grande-Bretagne et la Scandinavie.

Dès le début du VI^e millénaire, le lait était exploité en Europe centrale et en Italie centrale. Seulement 800 ans plus tard, il l'était aussi dans ce qui allait devenir le Nord de la Pologne. L'industrie laitière a

LES AUTEURS

Mélanie ROFFET-SALQUE est postdoctorante dans l'équipe de géochimie organique à l'Université de Bristol, au Royaume-Uni.

Richard EVERSHED, géochimiste, dirige l'équipe de géochimie organique de la Faculté de chimie de l'Université de Bristol.

BIBLIOGRAPHIE

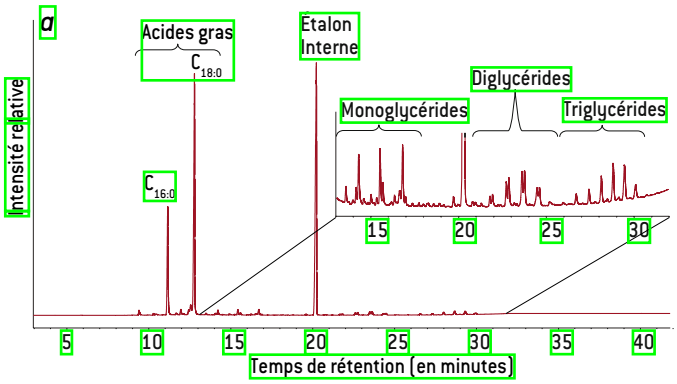
M. Salque *et al.*, **Earliest evidence for cheese making in the sixth millennium BC in northern Europe**, *Nature*, vol. 493, pp. 522-525, 2013.

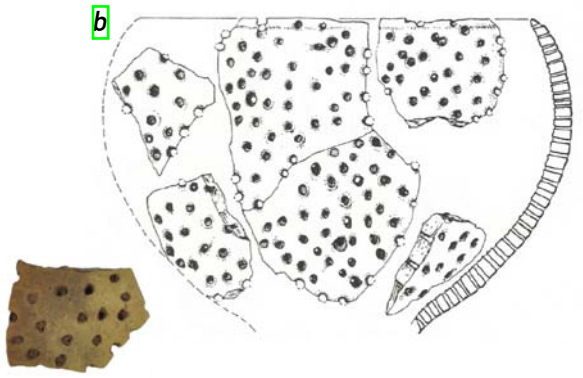
P. Gerbault *et al.*, **How long have adult humans been consuming milk ?**, *IUBMB Life*, vol. 65(12), pp. 983-990, 2013.

R. P. Evershed *et al.*, **Earliest date for milk use in the Near East and southeastern Europe linked to cattle herding**, *Nature*, vol. 455, 528-531, 2008.

M. S. Copley *et al.*, **Direct chemical evidence for widespread dairying in prehistoric Britain**, *PNAS*, vol. 100(4), pp. 1524-1529, 2003.

D. R. Harris (ed.), **The Origins and Spread of Agriculture and Pastoralism in Eurasia**, UCL Press, 1996.





4. LE CHROMATOGRAMME D'UNE GRAISSE ANIMALE DÉGRADÉE, extraite d'un tesson de poterie, consiste en une série de pics dont chacun correspond à un triglycéride ou à un composé issu de sa décomposition *(a)*. L'hydrolyse de ces composants principaux des graisses animales produit en effet des diglycérides, des monoglycérides et des acides gras repérables sur le chromatogramme. L'analyse de tessons perforés a permis de prouver que l'on a affaire à des fragments de faisselle ayant servi à produire du fromage *(b)*.

atteint la Scandinavie au début du IV^e^ millénaire. Curieusement, le lait semble avoir été adopté de manière particulièrement rapide en Grande-Bretagne, dès les débuts de l'élevage, alors qu'il l'a été plus progressivement en Europe continentale. Quoi qu'il en soit, son exploitation était intense outre-Manche à la fin du V^e^ millénaire. Tout aussi curieusement, le Nord de la Grèce semble avoir été réfractaire à l'adoption du lait et de ses produits : très peu de résidus laitiers datant du Néolithique y ont été détectés, et l'étude des stratégies d'abattage suggère que la production y était orientée vers la viande.

Les archéozoologues ont révélé à ce propos une dichotomie entre les sites méditerranéens et les sites plus continentaux. Les petits ruminants (chèvres et moutons) étaient les animaux les plus communs dans le cheptel des paysans néolithiques méditerranéens, sans doute parce qu'ils sont plus adaptés au pacage sous des climats plus arides. Dans les plaines du Nord de l'Europe, en revanche, les vaches dominaient dans les troupeaux du courant danubien, sans doute parce que, plus adaptées au pacage sous climat tempéré, elles étaient élevées pour leur lait. La structuration du cheptel européen telle que la recherche archéologique la révèle pourrait être résumée ainsi : moutons à viande et chèvres à lait dans le Sud, vaches à lait plutôt qu'à viande dans le Nord. Cette structuration est encore valable aujourd'hui.

Jusqu'à récemment, les recherches à l'origine de tous ces résultats n'avaient pas permis de relier l'élevage laitier constaté à des pratiques laitières particulières, par exemple à la fabrication de yaourts, de beurre ou de fromage. Tous les tessons que nous avons analysés provenaient en effet de récipients ayant vraisemblablement servi à cuire les aliments – certains ayant été marqués par le feu. Toutefois, la situation a changé avec la découverte, dans des sites du Rubané polonais, de fragments de poterie perforés de trous de deux à trois millimètres de diamètre. Dès les années 1980, François Poplin, du Muséum national d'histoire naturelle, et Peter Bogucki, de l'Université de Princeton, les ont comparés avec les poteries perforées recueillies par les ethnologues, et proposé qu'il s'agissait de fragments de faisselles à fromage. Pour autant, d'autres interprétations ont été données : ces « passoires » auraient servi à filtrer le miel de la cire d'abeille, à filtrer de la bière, à protéger une flamme, etc.

Des traces de fromage vieilles de 7 500 ans

Afin de trancher, nous avons entrepris d'analyser les résidus préservés dans ces poteries. Nous avons analysé un total de 60 tessons de poterie provenant de 34 récipients différents et de huit sites de la région de Cujavie, en Pologne, datés entre 5400 et 4800 avant notre ère. Les analyses chromatographiques ont révélé la présence de graisses animales dans 16 tessons perforés, et dans 15 d'entre eux, notre protocole d'identification des graisses animales par analyses isotopiques a mené à la conclusion qu'il s'agissait de résidus laitiers. Or la présence de tels résidus dans ces faisselles présumées fait écho à leur absence sur les mêmes sites dans les autres types de poterie, qui consistent pour l'essentiel en vases à cuire et en bouteilles. Ces récipients perforés sont donc bien des poteries spécialisées dans la transformation du lait : des faisselles, qui ont servi à faire du fromage il y a plus de 7 200 ans.

Nos résultats révèlent donc la trace la plus ancienne connue de fabrication de fromage, mais ils n'excluent nullement que le fromage ait pu être inventé ailleurs et plus tôt. En effet, rien n'empêchait de fabriquer aussi les fromages dans des récipients en matière organique, d'utiliser comme faisselles des paniers finement tressés, des plaquettes de bois percées, etc. Tous ces outils, s'ils ont existé, n'ont que très peu de chances d'avoir traversé le temps. Si nous savons où et quand s'est établie l'industrie laitière européenne, nous ignorons à quand remonte le fromage. Mais nous savons désormais qu'en Europe, on fait du fromage depuis 7 500 ans au moins.

Le cas de l'industrie laitière illustre de façon frappante comment le passage des populations préhistoriques de la prédation à la production a influencé la culture, l'économie et la vie des Européens. De fait, les changements culturels et biologiques qui se sont produits en Europe au cours du Néolithique ont non seulement structuré le cheptel européen, doté la plupart des Européens de la persistance de la lactase chez l'adulte, mais aussi conduit à la mondialisation de la filière laitière. L'existence de l'économie laitière mondiale, d'une importance considérable, est la conséquence directe de changements culturels et biologiques intervenus en Europe durant la Préhistoire. ■

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

SCIENCE & DÉVELOPPEMENT DURABLE ENFIN RÉCONCILIÉS !

Actuellement en vente en kiosque

www.green-magazine.fr

LISEZ GRATUITEMENT NOS DEUX DERNIERS NUMÉROS :

CANCER : desserrer les tumeurs pour mieux les traiter

Rakesh Jain

Dans une tumeur, les vaisseaux sanguins et lymphatiques sont souvent comprimés, ce qui empêche les médicaments anticancéreux d'atteindre leurs cibles. Des cancérologues espèrent améliorer l'efficacité des traitements en réduisant cette compression.

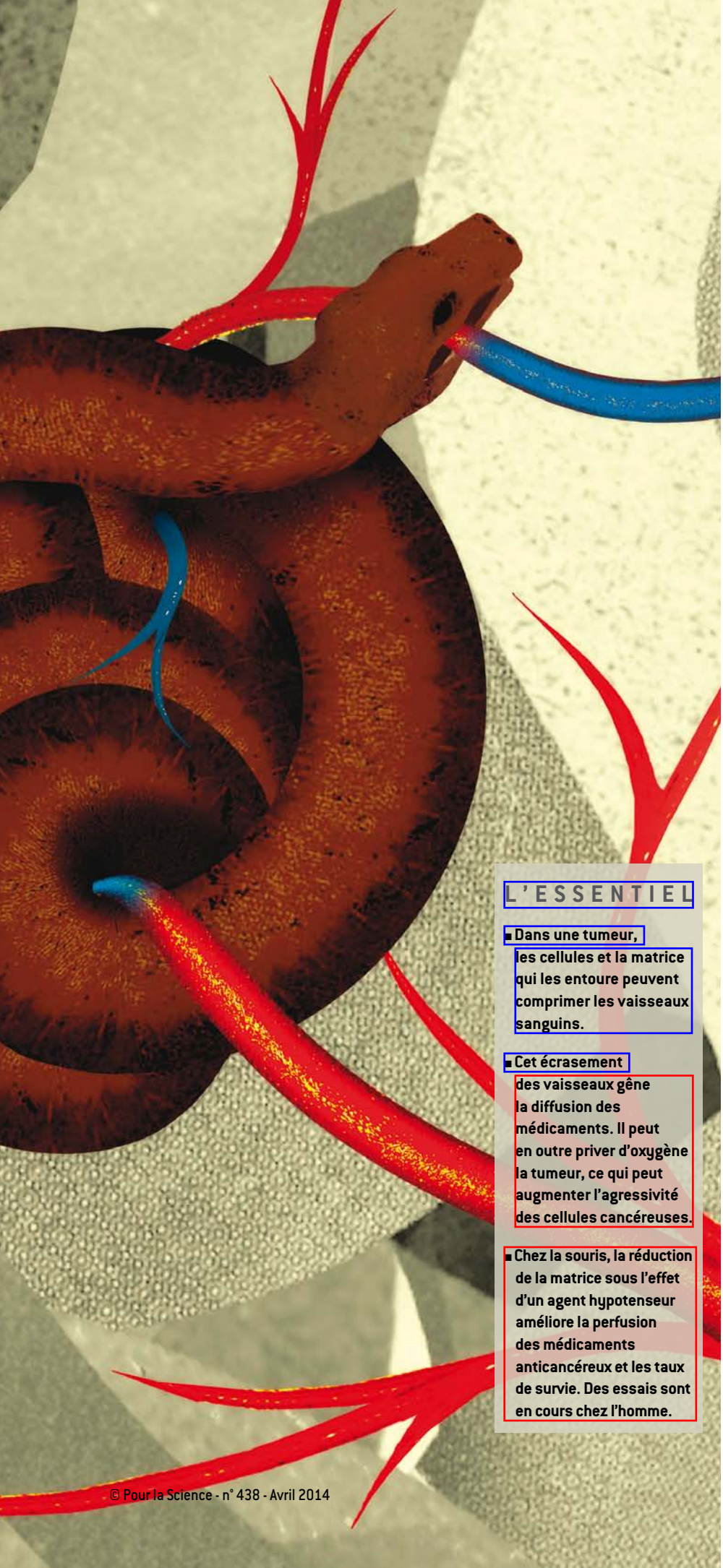
Brian Stauffer

Depuis près de 40 ans, je travaille sur la lutte contre le cancer sous un angle inhabituel. De par ma formation initiale d'ingénieur, je considère les tumeurs en partie comme un défi pour physicien et me pose la question : comment leurs caractéristiques structurelles favorisent-elles leur croissance et empêchent-elles les médicaments anticancéreux d'agir efficacement ?

Il y a plus de 20 ans, quand j'étais à l'Université Carnegie Mellon, nous avons par exemple découvert que dans une masse tumorale, les vaisseaux sanguins ont des anomalies structurelles qui nuisent à la bonne distribution des médicaments anticancéreux. Ces vaisseaux ont tendance à être trop sinueux et poreux, porosité qui entraîne une fuite du liquide et des médicaments présents dans le sang lorsque ce dernier pénètre dans la tumeur. Ce liquide, dit interstitiel, exerce à son tour une pression qui le fait suinter de la tumeur, et avec lui les agents pharmaceutiques. Par la suite, nous avons montré que la réduction de ces fuites peut faire baisser la pression du liquide interstitiel et améliorer l'irrigation de la tumeur par les médicaments, ce qui renforce l'efficacité de divers traitements anticancéreux.

Plus récemment, nous avons établi que la pression du liquide n'est pas la seule force physique perturbatrice. Les tumeurs sont un agglomérat de cellules malignes, de cellules non malignes et de vaisseaux sanguins et lymphatiques, tous ces éléments étant incorporés dans une matière fibreuse, la « matrice extracellulaire ». Cette matrice et les cellules peuvent écraser les vaisseaux sanguins et lymphatiques. Cette compression, que les physiciens et les ingénieurs nomment la contrainte solide, peut réduire ou bloquer l'alimentation en sang de nombreuses parties de la tumeur. Elle peut donc diminuer la quantité de médicament atteignant la tumeur et créer par ailleurs des conditions favorisant son développement.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014



L'ESSENTIEL

- **Dans une tumeur, les cellules et la matrice qui les entoure peuvent comprimer les vaisseaux sanguins.**
- **Cet écrasement des vaisseaux gêne la diffusion des médicaments. Il peut en outre priver d'oxygène la tumeur, ce qui peut augmenter l'agressivité des cellules cancéreuses.**
- **Chez la souris, la réduction de la matrice sous l'effet d'un agent hypotenseur améliore la perfusion des médicaments anticancéreux et les taux de survie. Des essais sont en cours chez l'homme.**

Conscients de tous les rôles préoccupants joués par la matrice tumorale, anormalement rigide dans les tumeurs et plus abondante dans certains cancers que dans d'autres, mes collègues et moi avons récemment recherché des moyens de la réduire. Nous avons trouvé une méthode qui nous séduit, en partie parce qu'elle repose sur une classe de médicaments déjà connus pour être dépourvus de risque : certains médicaments largement prescrits contre l'hypertension. Des études cliniques sont en cours pour tester un tel traitement dans un type de cancer du pancréas, qui est l'un des cancers les plus riches en matrice extracellulaire et les plus difficiles à traiter.

Agir sur la matrice extracellulaire

Bien sûr, nous ne pouvons pas promettre que des médicaments réduisant la matrice extracellulaire seront révolutionnaires. Le cancer désigne en fait de nombreuses pathologies différentes, toutes difficiles à combattre, mais si les médicaments agissent comme nous l'espérons, ils pourraient devenir un nouveau et puissant allié dans la lutte menée pour prolonger la vie des personnes atteintes de cancers résistants aux traitements.

L'idée d'agir sur la matrice extracellulaire m'est venue en apprenant que la compression des vaisseaux sanguins et lymphatiques dans les tumeurs est responsable de plusieurs troubles surprenants.

Par exemple, en situation normale, les vaisseaux lymphatiques suppriment les fluides en excès dans les tumeurs et d'autres tissus. Lorsque les vaisseaux lymphatiques sont bloqués par compression, ils ne peuvent pas drainer le liquide qui a exsudé des vaisseaux sanguins de la tumeur, d'où une augmentation de la pression des fluides.

Simultanément, la compression réduit la capacité déjà compromise des vaisseaux sanguins à alimenter l'ensemble d'une tumeur maligne en sang – et donc en oxygène, en cellules immunitaires et en médicaments anticancéreux.

De nombreuses régions de la tumeur se retrouvent ainsi privées d'oxygène. On pourrait croire que ce manque d'oxygène,

1. DANS UNE TUMEUR, les vaisseaux sanguins et lymphatiques sont souvent écrasés, ce qui présente plusieurs effets délétères et nuit à la bonne diffusion des médicaments.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

L'AUTEUR

Rakesh JAIN, professeur, dirige le Laboratoire de biologie tumorale au Département d'oncologie radiologique du *Massachusetts General Hospital* et de la Faculté de médecine de l'Université Harvard, aux États-Unis. Il est notamment membre de l'Académie américaine des sciences et de celle d'ingénierie.

SUR LE WEB

Le laboratoire de Rakesh Jain : http://steele.mgh.harvard.edu

Sur l'essai clinique réalisé au Massachusetts General Hospital et portant sur la réduction de la matrice extracellulaire dans le cancer du pancréas : http://clinicaltrials.gov/show/NCT01821729

ou hypoxie aurait un effet positif et empêcherait la tumeur de croître. En réalité, l'hypoxie peut être particulièrement néfaste. Le manque d'oxygène dans une tumeur incite parfois des cellules malignes et mêmes normales à sécréter des protéines qui suppriment l'activité des cellules immunitaires antitumorales. L'une de ces protéines, nommée facteur de croissance de l'endothélium vasculaire ou VEGF *(Vascular Endothelial Growth Factor)*, augmente également la porosité des vaisseaux sanguins, ce qui réduit encore plus le débit sanguindans les tumeurs et augmente davantage la pression du liquide interstitiel. De plus, l'hypoxie transforme certaines cellules immunitaires en complices de la tumeur.

Une hypoxie néfaste

Ce n'est pas tout. L'hypoxie favorise la survie des cellules les plus malignes (celles le plus à même d'envahir les tissus et de se propager), les cellules moins malignes ayant tendance à se « suicider » lorsque l'oxygène se raréfie. Pire encore, une pénurie d'oxygène peut augmenter les tendances invasives des cellules cancéreuses, par exemple en les incitant à produire des protéines qui les aident à migrer hors de la tumeur initiale. Enfin, l'absence d'oxygène perturbe le fonctionnement de nombreux médicaments anticancéreux.

Par ailleurs, nous avons récemment découvert que la compression mécanique peut reprogrammer certaines cellules cancéreuses : pour l'essentiel, elles deviennent des « chefs de file » qui commencent à envahir les tissus voisins et à inciter d'autres cellules à les suivre.

De plus, en un cercle vicieux, la compression et l'hypoxie peuvent chacune stimuler des cellules dédiées à la production de matrice extracellulaire, telles que les fibroblastes, et inciter certaines cellules cancéreuses à sécréter des composants de la matrice.

Bien sûr, mon équipe avait compris les conséquences de l'hypoxie avant même de commencer à travailler sur la matrice et nous avons tout de suite recherché des moyens de réduire cette privation d'oxygène. Nous avons d'abord proposé, il y a près de 13 ans, que la « normalisation » des vaisseaux (la réduction de leur sinuosité et de leur porosité) améliorerait la perfusion sanguine dans l'ensemble de la tumeur et réduirait la pression des fluides. On diminuerait ainsi l'hypoxie et ses effets, et l'on faciliterait l'accès des médicaments et des cellules immunitaires à la tumeur.

Nous avons récemment apporté des arguments en faveur de cette hypothèse, à la fois chez l'animal et chez l'homme. En effet, nous avons montré qu'en rétablissant partiellement l'état normal des vaisseaux sanguins, à l'aide d'inhibiteurs de la formation de nouveaux vaisseaux sanguins (des médicaments dits anti-angiogéniques), on obtient une augmentation du flux sanguin et de l'apport d'oxygène dans des tumeurs cérébrales ; et, aspect d'une importance cruciale, cela permet de prolonger la vie de certains patients.

Ce mécanisme peut également expliquer une survie prolongée chez les patients atteints d'un cancer du côlon, des poumons ou des reins, traités par l'anti-angiogénique bévacizumab (ou Avastin®) associé à une chimiothérapie (administration de médicaments qui tuent les cellules cancéreuses en division rapide) ou à une immunothérapie (traitement visant à intensifier la réaction immunitaire de l'organisme contre les tumeurs).

Les chercheurs continuent d'optimiser la méthode, qui ne suffira cependant jamais à elle seule : en effet, ce n'est pas la pression du liquide qui comprime les vaisseaux sanguins et lymphatiques dans la tumeur, mais les cellules et la matrice extracellulaire (lorsque la pression du liquide augmente autour de vaisseaux qui fuient, le liquide regagne ces vaisseaux par leurs pores, plutôt que de les écraser, *voir l'encadré page 62*).

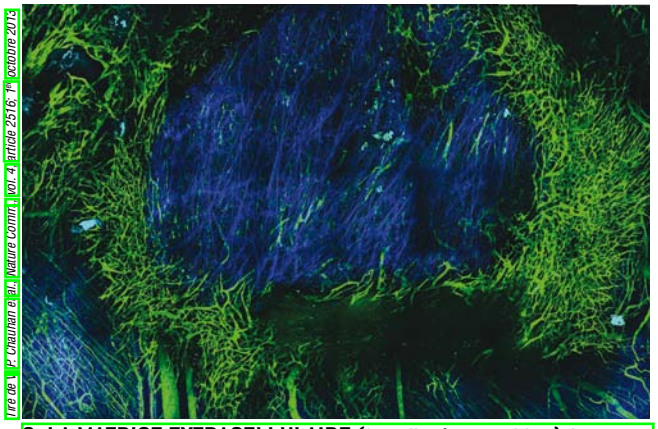
Diminuer la contrainte solide

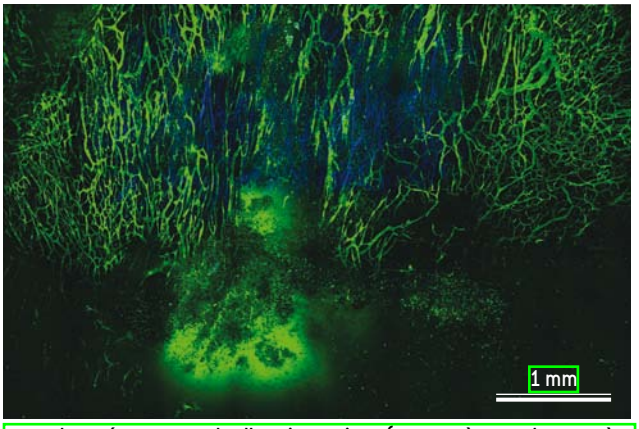
Par ailleurs, les médicaments anti-angiogéniques ne peuvent ouvrir des vaisseaux comprimés et bloqués par la matrice et des cellules. C'est là qu'interviennent nos travaux visant à réduire la matrice extracellulaire et à diminuer ainsi la compression.

Avant de rechercher des médicaments susceptibles de réduire cette matrice, nous voulions nous faire une idée plus précise des différences entre tumeurs en termes d'abondance de matière et de degré de contrainte exercé par les composantes solides. Nous avons constaté que les cancers sont variables à cet égard, bien que l'examen au microscope de nombreuses masses tumorales humaines nous ait indi-

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

Tirée de : V. Chauhan et al., Nature Comm., vol. 4, article 2516, 1er octobre 2013





2. LA MATRICE EXTRACELLULAIRE *(le collagène, en bleu)* dans une tumeur mammaire de souris diminue et la circulation sanguine *(en vert)* augmente, en réaction à l'administration de losartan, un inhibiteur des récepteurs de l'angiotensine *(avant, à gauche ; après, à droite)*. Dans d'autres études chez l'animal, de telles modifications ont amélioré l'efficacité de médicaments anticancéreux.

qué que la plupart d'entre elles présentent des vaisseaux écrasés.

L'ampleur de l'écrasement dépend en partie du stade de développement de la tumeur et de sa localisation. Un espace confiné, par exemple, augmente la compression et le nombre de vaisseaux qui sont partiellement ou totalement écrasés. Le type de tumeur joue également un rôle. Ainsi, le cancer du pancréas le plus fréquent (l'adénocarcinome canalaire pancréatique) présente en général relativement peu de cellules cancéreuses, moins de cinq pour cent en masse, mais beaucoup de matrice extracellulaire et de fibroblastes. D'autres cancers, tel le médulloblastome, la plus fréquente des tumeurs cérébrales malignes de l'enfant, se caractérisent par une matrice extracellulaire peu abondante.

Des travaux supplémentaires ont montré qu'en général, les tumeurs qui présentent une proportion élevée de matrice et de fibroblastes par rapport aux cellules cancéreuses – les tumeurs dites desmoplastiques – tendent à répondre moins bien à une chimiothérapie. Cela suggère qu'en diminuant la quantité de matrice dans ces masses tumorales, on augmentera peut-être les chances que les médicaments atteignent leurs cibles et qu'ils soient ainsi plus efficaces.

Initialement, les efforts de mon équipe pour trouver des agents capables de réduire la matrice extracellulaire ont bénéficié d'une découverte fortuite. Cette matrice est constituée de fibres protéiques (contenant principalement du collagène) et de composés sous forme de gel, tels que l'acide hyaluronique. À un moment donné, les chercheurs ont pensé que les molécules formant un gel jouaient un rôle plus important que le collagène dans la mauvaise distribution des médicaments dans les tumeurs. Mais en 2000, nous avons trouvé, à notre grande surprise, que la rigidité du tissu, qui dépend de la quantité de collagène qu'il contient, est plus importante. Nous avons aussi découvert que le fait de casser les fibres à l'aide d'une enzyme qui dégrade le collagène (la collagénase) augmente fortement la diffusion de particules mesurant 150 nanomètres, même dans les tumeurs les plus résistantes à leur pénétration (les nanoparticules sont de plus en plus étudiées pour détruire de façon ciblée les cellules cancéreuses, bien que le succès de cette approche soit pour l'instant modéré).

LES TUMEURS AYANT UNE PROPORTION élevée de matrice et de fibroblastes par rapport aux cellules cancéreuses tendent à répondre moins bien à une chimiothérapie.

Nous avons ensuite montré que, chez la souris, les tumeurs se réduisaient davantage lorsque nous injections dans leur masse de la collagénase associée à des particules virales de 150 nanomètres visant à tuer les cellules cancéreuses, que lorsque nous injections les particules virales sans collagénase.

Pour intéressant que fût ce résultat, nous savions que l'administration d'une enzyme qui dégraderait le collagène dans tout l'organisme serait problématique chez l'être humain, car le collagène structure nos os et nos tissus. Il fallait un médicament plus sûr, qui agisse sur les tumeurs sans produire d'effets trop vastes. Mais lequel ?

Nous avons rapidement envisagé une hormone nommée relaxine, que les femmes produisent durant la grossesse. La relaxine inhibe la synthèse de collagène et augmente sa dégradation. Les futures mères en produisent beaucoup, sans effets néfastes. Nous nous sommes donc demandé si on pourrait l'utiliser pour réduire le collagène dans les tumeurs.

En 2002, nous avons traité avec de la relaxine des souris porteuses de tumeurs pendant deux semaines. Effectivement, l'hormone a réorganisé le collagène, ce qui l'a rendu plus poreux et a amélioré la diffusion, dans les tumeurs, de grosses molécules que nous avons utilisées comme substituts de médicaments. D'autres chercheurs ont confirmé nos résultats pour différentes tumeurs. Mais nous avons alors eu connaissance de travaux indiquant que la relaxine pourrait stimuler le développement de certaines tumeurs, telles que celles de la prostate. Étant donné la disparité des résultats et les risques encourus, nous savions que nous ne pourrions jamais tester la relaxine en tant qu'agent anticancéreux chez l'être humain.

Déçus, nous avons commencé à chercher d'autres agents. Nous avons porté nos efforts sur l'attaque d'un élément clef intervenant dans la stimulation de la synthèse du collagène, à savoir une protéine nommée facteur de croissance transformant bêta (TGF-β). Nous avions trouvé un moyen possible d'y parvenir,

lorsque nous nous sommes rendu compte que des médicaments couramment utilisés pour traiter l'hypertension (pression artérielle élevée) non seulement font baisser la pression sanguine, mais aussi inhibent l'activité du facteur de croissance. Qui plus est, ces agents largement prescrits, qui diminuent la pression artérielle en inhibant une hormone nommée angiotensine II, perturbent la fonction d'une seconde molécule intervenant dans la stabilisation du collagène.

Réduire le collagène en bloquant l'angiotensine

Nous savions que divers inhibiteurs des récepteurs de l'angiotensine, notamment le losartan, réduisent les niveaux de plusieurs formes de collagène chez des animaux de laboratoire présentant des quantités excessives de matrice extracellulaire et permettent d'inverser cet excès dans les reins et le cœur de patients souffrant d'hypertension. Nous n'avons toutefois trouvé aucune publication portant sur l'effet de ces médicaments sur les niveaux de collagène ou sur la compression des tumeurs.

Pour voir si les agents antagonistes des récepteurs de l'angiotensine pourraient réduire la matrice dans les tumeurs et améliorer ainsi la distribution de médicaments anticancéreux, nous avons administré du losartan pendant deux semaines à des souris porteuses de quatre types différents de tumeurs riches en matrice : un adénocarcinome canalaire pancréatique, un cancer mammaire, un mélanome (cancer de la peau) et un sarcome (cancer du tissu conjonctif).

Nous avons observé deux effets encourageants. Le collagène a diminué dans les tumeurs, et les particules de 100 nanomètres utilisées en tant que substituts de médicaments anticancéreux ont mieux irrigué les tumeurs. Nous avons conclu que la meilleure pénétration de ces substituts était due à la réduction du contenu en collagène. Des études réalisées chez des rongeurs, publiées en 2011, ont prouvé que c'est le cas avec de vrais nanomédicaments : le Doxil, approuvé par la *Food and Drug Administration* (FDA) et constitué de particules d'environ 100 nanomètres de diamètre, et des particules virales anticancéreuses d'environ 150 nanomètres de diamètre.

Au cours de nos recherches, nous avons également constaté que plus la dose de losartan est élevée, plus la diminution du collagène est importante. Des doses de losartan supérieures à celles testées auparavant pourraient donc diminuer le collagène suffisamment pour que les vaisseaux sanguins se dilatent, même au sein de tumeurs riches en matrice extracellulaire. De fait, le doublement de la dose chez des souris a réduit le collagène dans des tumeurs mammaires et pancréatiques riches en matrice, a dilaté les vaisseaux sanguins et amélioré l'apport et l'efficacité non seulement de médicaments nanométriques, mais également d'agents chimiothérapeutiques couramment utilisés dans le traitement de ces cancers.

Nous nous sommes alors demandé si des doses suffisamment fortes de losartan ou d'autres médicaments hypotenseurs augmenteraient l'efficacité de la chimiothérapie classique et des nanomédicaments chez les patients atteints d'un cancer. Nous n'avons pas encore de réponse définitive, mais nous avons des raisons d'être optimistes. Des revues d'études antérieures menées auprès de patients souffrant d'un cancer et d'hypertension, qui recevaient donc à la fois un traitement anticancéreux et des médicaments hypotenseurs, montrent que certains agents hypotenseurs semblent améliorer quelque peu les résultats.

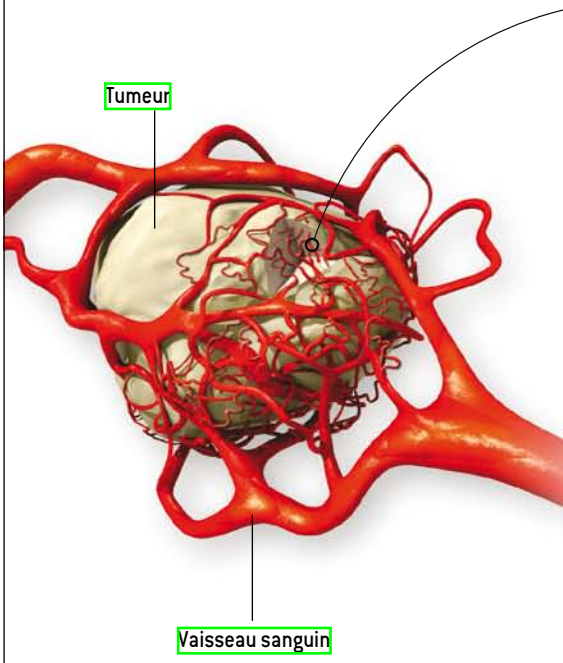
Par exemple, une analyse de recherches antérieures a indiqué qu'en association avec le médicament anticancéreux nommé gemcitabine, les inhibiteurs de l'angiotensine ou de certaines enzymes apparentées prolongeaient la survie globale chez les patients atteints d'un adénocarcinome canalaire pancréatique d'environ six mois par rapport à la survie obtenue avec la chimiothérapie seule.

Bien entendu, les études rétrospectives ont leurs limites, mais les données obtenues chez les patients cancéreux traités pour hypertension concordent avec nos résultats obtenus chez la souris et motivent la réalisation d'essais cliniques avec des médicaments qui bloquent les récepteurs de l'angiotensine, afin de réduire la matrice.

Une équipe du *Massachusetts General Hospital* a ainsi démarré un essai avec le losartan associé à une chimiothérapie standard chez des patients atteints d'un adénocarcinome canalaire pancréatique, pour lequel le taux de survie à cinq ans est de moins de six pour cent. On en attend les résultats d'ici quelques années. Dans le futur, si tout se passe bien, on pourra améliorer les traitements en combinant des médicaments normalisant les vaisseaux (tels que les agents bloquants du VEGF), des agents réduisant la matrice et des produits tuant les cellules cancéreuses de façon ciblée.

Comme cela vaut pour la plupart des médicaments, les médicaments hypotenseurs présentent quelques inconvénients. Ils ne peuvent pas être administrés aux personnes souffrant de certaines maladies rénales ou d'hypotension. Même pour les patients dont la pression artérielle est

En théorie, les agents anticancéreux véhiculés par le sang devraient atteindre tous les recoins de la masse tumorale et attaquer toutes les cellules cancéreuses qu'elle contient. Mais les forces de compression exercées par les composantes liquides et solides de la tumeur peuvent être suffisamment intenses pour bloquer la progression des médicaments vers de nombreuses cellules qu'ils sont censés détruire. Les cancérologues disposent déjà d'agents pouvant contribuer à réduire la pression du liquide et, désormais, comme l'explique l'auteur, des chercheurs pensent avoir trouvé un moyen de réduire également la contrainte solide exercée par les cellules et la matrice extracellulaire.



© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

normale, les doses doivent être soigneusement contrôlées pour éviter des chutes de tension trop fortes.

Ces problèmes pourraient être résolus en trouvant des moyens de modifier les antagonistes des récepteurs de l'angiotensine de telle sorte qu'ils conservent la capacité de diminuer la matrice tout en ne faisant pas baisser la pression artérielle. C'est l'objectif que nous cherchons à atteindre. Cependant, les tumeurs ont tendance à développer une résistance à la plupart des médicaments. Développeront-elles une résistance au losartan ou à d'autres inhibiteurs de l'angiotensine ? On l'ignore.

Qu'en est-il des patients qui ne peuvent pas prendre de médicaments hypotenseurs ou dont les tumeurs ne réagissent pas bien ou de façon durable à ces médicaments ? Cibler spécifiquement les molécules d'acide hyaluronique, non fibreuses, présentes dans les tumeurs pourrait être une autre façon d'attaquer la matrice. L'acide hyaluronique est abondant dans environ un quart des tumeurs humaines, telles que l'adénocarcinome canalaire pancréatique et les cancers du sein, du côlon et de la prostate. Nous avons récemment montré qu'une enzyme qui diminue sa concentration, une hyaluronidase, peut effectivement réduire la contrainte solide dans des tumeurs développées chez des souris. Nous avons également montré que le losartan peut réduire l'acide hyaluronique dans des tumeurs. D'autres chercheurs ont montré qu'une hyaluronidase permet de décomprimer les vaisseaux sanguins.

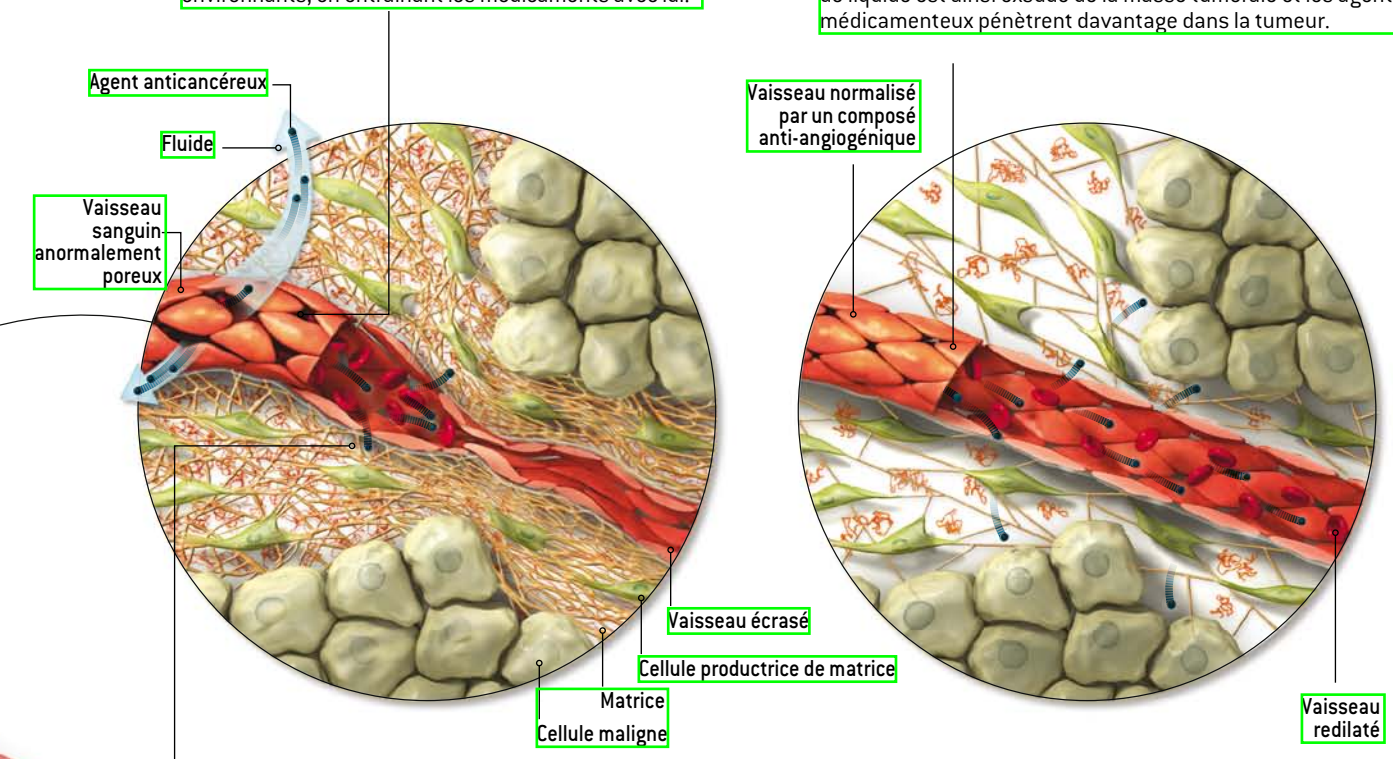
LES FORCES À PRENDRE EN COMPTE

LES OBSTACLES

Les vaisseaux de la tumeur étant anormalement poreux, la pression du fluide est souvent élevée. En effet, quand le sang pénètre dans la tumeur, du liquide et de nombreuses molécules de médicament sont exsudés. Le liquide est alors poussé vers l'extérieur de la tumeur et suinte vers les tissus environnants, en entraînant les médicaments avec lui.

LES SOLUTIONS

Les médicaments anti-angiogéniques permettent de réduire la pression fluide et sont utilisés dans le traitement du cancer depuis près de dix ans. Ils sont connus surtout pour leur effet inhibiteur de la formation de nouveaux vaisseaux sanguins, qui alimenteront la tumeur, mais ils peuvent aussi « normaliser » les vaisseaux sanguins en les rendant moins poreux ; moins de liquide est ainsi exsudé de la masse tumorale et les agents médicamenteux pénètrent davantage dans la tumeur.



La contrainte solide est une force de compression. Lorsque la matrice et des cellules compriment les vaisseaux sanguins, elles entravent la circulation sanguine et empêchent les médicaments anticancéreux d'atteindre les cellules malignes au-delà de la région écrasée. En même temps, la matrice peut piéger des molécules de médicament, ce qui limite encore plus leur dispersion dans la masse tumorale. L'écrasement des vaisseaux sanguins prive aussi les tumeurs d'oxygène, un effet susceptible de favoriser la propagation du cancer et d'entraver les réactions immunitaires dirigées contre la tumeur *(non représenté)*.

On a montré chez la souris que des substances qui réduisent la matrice diminuent la contrainte solide et, de ce fait, améliorent la circulation sanguine dans la tumeur, ainsi que la diffusion des médicaments anticancéreux. Ces substances réduisant la matrice comprennent un médicament hypotenseur courant, qui fait actuellement l'objet d'un essai clinique chez des patients atteints d'un cancer du pancréas, afin de déterminer s'il améliore l'efficacité des médicaments anticancéreux.

ENJUY CADRU

Sur la base de ces études, une enzyme de ce type, nommée PEGPH20, est désormais en essai clinique pour le cancer du pancréas. Notre équipe et d'autres ont également obtenu des succès en laboratoire avec certains autres médicaments connus pour agir partiellement sur la matrice.

Plusieurs effets à évaluer

Pour parfaire le traitement par réduction de la matrice, les chercheurs doivent trouver des façons de mesurer la réaction de la matrice aux différents agents testés. Les substances qui perturbent la matrice des tumeurs réduisent-elles réellement la compression mécanique ? Lesquelles sont les plus efficaces ? Le degré de réduction se traduit-il par une différence d'efficacité des médicaments anticancéreux plus classiques administrés de façon concomitante ?

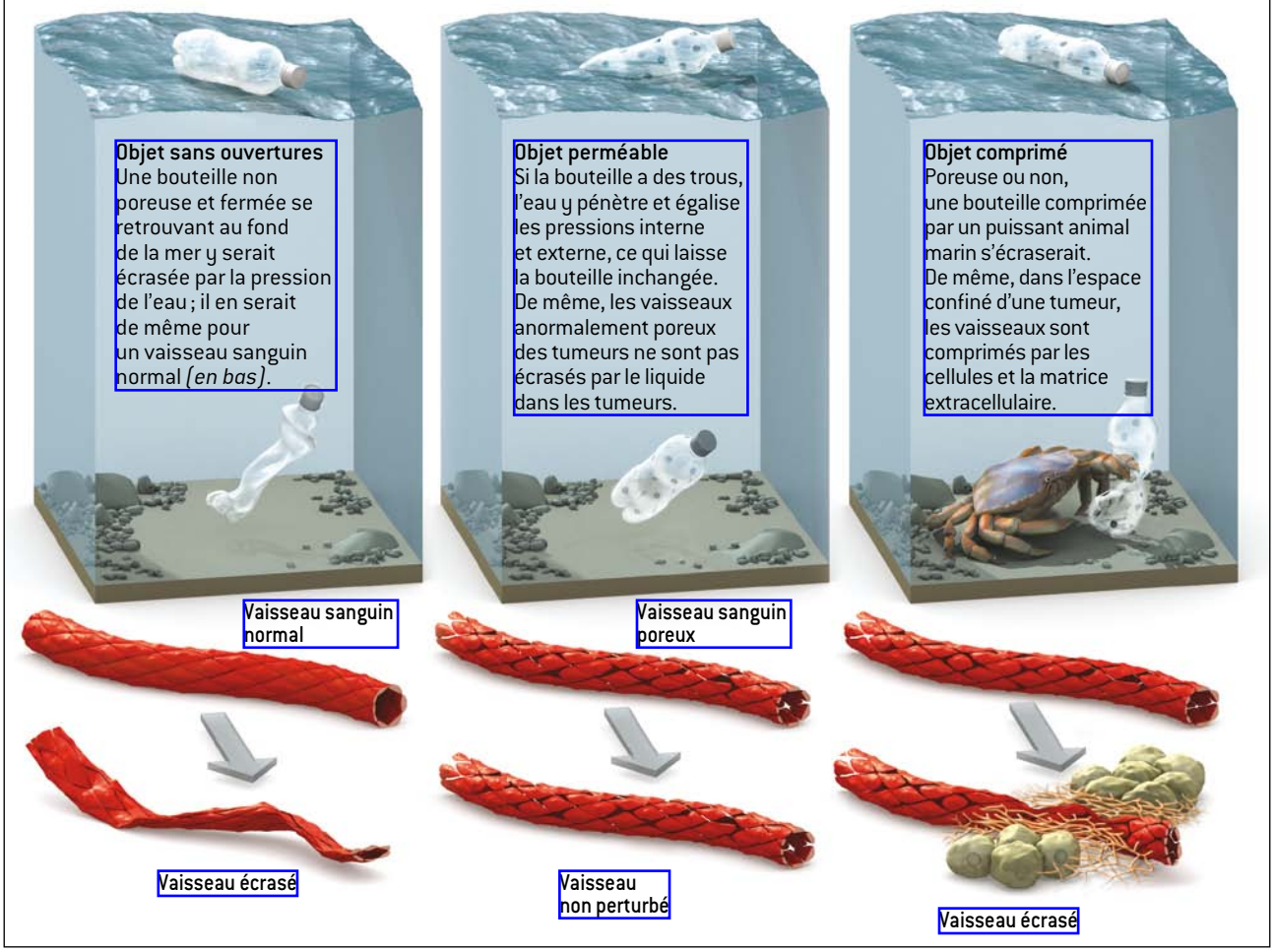
Des progrès ont été obtenus également sur ce plan. Une nouvelle méthode d'imagerie, dite par génération de second harmonique, devrait aider les chercheurs à visualiser et à quantifier le collagène des tumeurs. De plus, nous avons trouvé une façon relativement simple d'évaluer la contrainte compressive dans une tumeur : lorsque la tumeur d'un animal de laboratoire est coupée en deux, les deux moitiés enflent spontanément. La mesure du gonflement et l'application de formules mathématiques que nous avons développées permettent de quantifier la contrainte qui régnait au sein de la tumeur.

On me demande parfois si la réduction de la matrice n'aiderait pas les cellules cancéreuses à métastaser, c'est-à-dire à traverser la matrice et à atteindre des vaisseaux sanguins ou lymphatiques, puis à se propager dans d'autres parties du corps. De même, certains se demandent si le fait de dégrader la matrice ou de dilater les vaisseaux sanguins et d'augmenter ainsi le flux sanguin dans la tumeur ne faciliterait pas la fuite de cellules tumorales dans le sang ou la croissance de la tumeur en fournissant davantage de nutriments aux cellules cancéreuses, ou les deux à la fois.

Ces inquiétudes nécessitent des études complémentaires, mais plusieurs observations suggèrent que la croissance des tumeurs et les métastases ne seraient pas favorisées. Pourquoi ? D'un côté, il est vrai

POURQUOI SEULS LES SOLIDES COMPRIMENT LES VAISSEAUX SANGUINS

Beaucoup sont surpris d'apprendre que seule la matrice extracellulaire et les cellules des tumeurs compriment et bloquent les vaisseaux sanguins ; l'augmentation de la quantité de liquide n'intervient pas dans cet effet. Pour expliquer ce qui se passe, on peut faire l'analogie, chère à l'auteur, avec une bouteille en plastique tombée à la mer.



Insets: Jason Wasserman, au centre, la bouteille en plastique ; Jennifer Hall, en haut, à gauche, le crabe ; Jason Wasserman, en haut, à droite, la bouteille ; Jason Wasserman, en bas, à droite, le crabe

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

que des nutriments parviendraient aux cellules tumorales, qui seraient également plus libres de migrer. Mais d'un autre côté, on réduirait la privation d'oxygène, qui favorise le développement de la tumeur et diminue la capacité de la réponse immunitaire ainsi que l'efficacité de nombreux traitements. En outre, des quantités plus importantes de médicaments et un nombre potentiellement plus élevé de cellules immunitaires se déploieraient dans la tumeur. Des études en cours chez l'animal et l'humain montreront lesquels de ces effets dominent.

Quand nous avons commencé à envisager de combattre le cancer avec des antagonistes des récepteurs de l'angiotensine, plusieurs chercheurs consultés nous ont dissuadés de suivre cette voie. Comme les agents bloquants diminuent la pression artérielle, ils entraîneraient normalement une diminution de la circulation sanguine et non une augmentation. De plus, des études portant sur l'administration d'angiotensine (qui, contrairement à son blocage, augmente la pression artérielle) ont révélé une augmentation de la circulation sanguine dans les tumeurs dans de nombreuses études menées chez la souris et l'être humain.

Contre-attaque physique

Toutefois, ces travaux n'ont pas pris en compte les effets de compression de la matrice et un essai visant à évaluer l'efficacité du traitement du cancer par l'angiotensine chez des patients a échoué. Quelques années plus tard, nous avons expliqué l'échec : le médicament n'augmentait que transitoirement la circulation sanguine, vraisemblablement parce que la contrainte compressive a rapidement bloqué les vaisseaux touchés.

En cancérologie, il ne s'agit plus seulement de mieux comprendre les fondements génétiques et cellulaires du cancer. Il faut aussi prendre en compte les forces mécaniques, que les tumeurs solides exploitent pour survivre. Nous pouvons nous servir de nos propres connaissances en physique pour contre-attaquer. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. K. Jain, **Normalizing tumor microenvironment to treat cancer : Bench to bedside to biomarkers,** *Journal of Clinical Oncology*, vol. 31(31), pp. 2205-2218, 2013.

V. P. Chauhan *et al.*, **Angiotensin inhibition enhances drug delivery and potentiates chemotherapy by decompressing tumor blood vessels,** *Nature Communications*, vol. 4, article 2516, 2013.

T. Stylianopoulos *et al.*, **Causes, consequences and remedies for growth-induced solid stress in murine and human tumors,** *PNAS*, vol. 109(38), pp. 15101-15108, 2012.

Toutes les ARCHIVES

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

depuis 1996

maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr*

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.

PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Editeur scientifique de référence depuis 1980

PARUTIONS PRINTEMPS 2014

LA FACE CACHÉE DE LA LUNE : LA SCIENCE ET LES COÏNCIDENCES

François Rothen

Le nouvel ouvrage du physicien François Rothen dresse l'inventaire, dans un texte simple et accessible à tous, des surprenantes coïncidences, des hasards extraordinaires et des analogies parfois trompeuses qui ont marqué la recherche scientifique.
Où l'on y démystifie une fois pour toute l'astrologie, la numérologie et les autres pseudosciences.

288 pages, ISBN 9782889150410

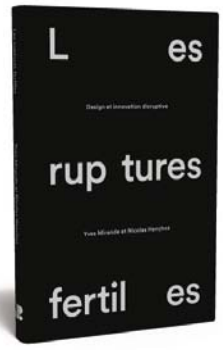
LES RUPTURES FERTILES

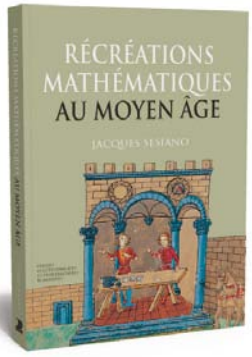
Design et innovation disruptive

Nicolas Henchoz, Yves Mirande

Le design joue un rôle essentiel dans l'appropriation par la société de toute technologie de rupture. Sa pratique peut transformer une performance technologique en innovation et, par conséquent, en usages inscrits dans le quotidien. Un livre évènement, richement illustré, qui montre que le design est bien différent du « gadget » marketing que l'on croit.

220 pages, ISBN 9782889150328





RÉCRÉATIONS MATHÉMATIQUES AU MOYEN ÂGE

Jacques Sesiano

A la croisée de l'histoire et des mathématiques, ce livre s'adresse à tous ceux, spécialistes (étudiants et enseignants en mathématiques, médiévistes) comme amateurs, tentés par le dépaysement d'une immersion dans la vie quotidienne et intellectuelle du Moyen Age.

300 pages, ISBN 9782880744984

TRACES D'ARMES À FEU

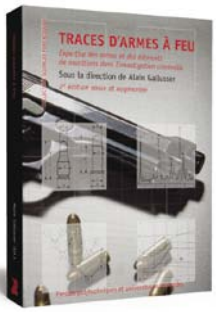
Expertise des armes et des éléments de munitions dans l'investigation criminelle

2e éd. revue et augmentée

Alain Gallusser éd.

Un désormais « classique » de la littérature en sciences criminelles. Cette nouvelle édition a été largement revue et augmentée par les meilleurs spécialistes francophones du domaine ; le chapitre consacré à la balistique est notamment entièrement nouveau, tout comme celui dédié à l'identification des armes par les traces laissées sur les éléments de munition lors du tir.

496 pages, ISBN 9782880748876



NOUVEAUTÉS

ET OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

www.ppur.org
www.epflpress.com

Ouvrages disponibles en librairie

Cahier spécial

Eau Santé Environnement

Migrations Économie

L'adaptation au changement climatique

Dans ce troisième volet du *Cahier spécial : Adaptation au changement climatique*, sont abordées de nouvelles questions. Comment préserver la ressource en eau et en optimiser l'usage ? Quelles conséquences le changement climatique aura-t-il sur l'émergence et la propagation des maladies ? L'approche économique peut-elle apporter des réponses et orienter les décisions stratégiques ?
Face à l'évolution de son environnement, l'homme est soumis à de nouvelles contraintes. Il étudie comment les gérer et en minimiser les effets. Les questions soulevées sont complexes, mais cette complexité ne peut servir de prétexte à l'inaction. Mieux prendre en compte des paramètres naguère négligés, améliorer toute la chaîne de production, pour qu'elle devienne plus « intelligente » : la tâche est immense, mais pas (encore) hors de portée !

ANTICIPER UNE DIMINUTION DE LA RESSOURCE EN EAU 66
F. Habets, Ph. Mérot, B. Itier, A. Thomas

VERS UNE ÉCOLOGIE DE LA SANTÉ 70
O. Plantard, L. Huber, J.-F. Guégan

COMMENT GÉRER LES FLUX MIGRATOIRES ? 76
F. Gemenne

LES ENJEUX ÉCONOMIQUES 78
P.-A. Jayet, S. De Cara, N. de Noblet-Ducoudré

DES MENACES AUX SOLUTIONS 82
J.-F. Soussana, T. Caquet, J. Mousset

En partenariat avec

INRA SCIENCE & IMPACT

IgorJPlata/Shutterstock
Alx Yago / Shutterstock
krender / Shutterstock
Andrey Iuji / Shutterstock

Anticiper une diminution de la ressource en eau

vvoe/ Shutterstock

Florence Habets est directrice de recherche CNRS dans l'Unité milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols de l'Université Pierre et Marie Curie.

Philippe Mérot est directeur de recherche dans l'Unité sol agro et hydrosystèmes spatialisation de l'INRA.

Bernard Itier est directeur honoraire de l'Unité environnement et grandes cultures de l'INRA.

Alban Thomas est directeur de recherche au Laboratoire d'économie des ressources naturelles de l'INRA.

La ressource en eau subira de plein fouet le changement climatique. Il sera indispensable de réduire les consommations et de mettre en place une gestion raisonnée de cette ressource fragile et limitée.

Les ressources en eau seront inévitablement modifiées par le réchauffement climatique. Ce sera donc le cas des quatre principaux usages : domestiques, agricoles, industriels et environnementaux. Quel sera l'impact sur les quantités d'eau disponibles ? Quelles seront les nouvelles règles de partage et quels moyens pourra-t-on mettre en œuvre pour s'y préparer ?

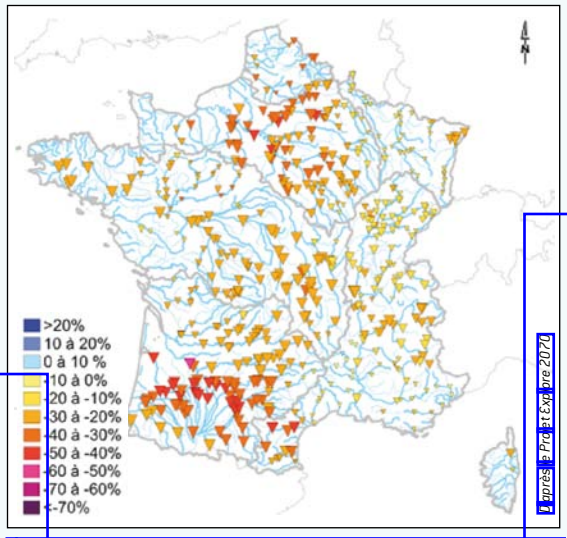
L'élévation des températures aura de multiples conséquences, souvent liées, sur cette ressource limitée. Elle modifiera, tout d'abord, la répartition géographique des pluies, car la hausse des températures sera moins forte à l'équateur qu'au niveau des pôles. Or, à l'échelle de la planète, le gradient des températures est associé à la circulation des grandes masses d'air et, par conséquent, au transport de chaleur et aux vents circulant aux latitudes moyennes. En Europe, dès 2050, les précipitations devraient avoir diminué dans les zones méridionales et augmenté dans les régions septentrionales.

De surcroît, avec l'augmentation des températures, l'atmosphère contiendra davantage de vapeur d'eau, ce qui perturbera encore le régime des pluies. Dans les zones tempérées et humides, cela se traduira par une fréquence accrue des précipitations fortes (plus de dix millimètres par jour) – une tendance que l'on observe déjà sur l'ensemble des continents. Dans les régions sèches, en revanche, la hausse des températures entraînera une diminution de la fréquence des pluies, car le seuil de déclenchement des précipitations devrait être plus élevé qu'aujourd'hui.

Eau verte et eau bleue

Le surplus d'eau contenu dans un air plus chaud résulte d'une augmentation des échanges hydriques avec la surface, l'eau s'évaporant davantage. Cette « demande évaporative » accrue est facilement satisfaite au-dessus des océans. Elle est plus contraignante au niveau des continents, où l'évaporation provient surtout de la végétation qui puise l'eau dans les sols. On parle alors d'« eau verte », car cette eau contribue à la production de biomasse *via* le processus de photosynthèse. L'autre forme d'eau présente sur les continents est appelée « eau bleue ». On la trouve dans les lacs, les ri-

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014



Évolution attendue du débit moyen annuel des cours d'eau français. On a comparé les moyennes des années 1961 à 1990 et des moyennes prévues entre 2046 et 2065. On voit que les régions Sud-Ouest et Nord subiront des baisses aux alentours de 50 pour cent. La taille des triangles indique le degré de convergence des 14 simulations moyennées.

vières, les nappes souterraines et les zones humides. C'est celle qu'on utilise pour les besoins en eau potable, pour l'industrie et pour l'agriculture.

Or, qu'il s'agisse de l'eau bleue ou de l'eau verte, elles sont issues des pluies, et sont donc interdépendantes : une déperdition d'eau verte entraîne une diminution d'eau bleue. En France, on estime ainsi que le réchauffement climatique provoquera une baisse de 20 à 30 pour cent des débits annuels d'eau bleue dès 2050 *(voir la carte ci-contre)*. Cette diminution devrait s'accompagner de sécheresses à la fois plus fréquentes et plus longues, sans pour autant diminuer le risque de crues. Au contraire, ce risque pourrait augmenter dans certaines régions, tel le Sud-Est de la France.

Les adaptations envisageables

Comment s'adapter à ces changements prévisibles ? Une première voie d'adaptation consiste à mettre en place une politique de l'offre – c'est-à-dire à compenser les futures pénuries par de nouvelles ressources. Pour ce faire, on peut développer les dispositifs de prélèvement, tels que le pompage des nappes et la déviation de rivières. On peut aussi construire de nouvelles usines de dessalement, des barrages hydrauliques et des réserves artificielles servant à stocker l'eau de pluie. De telles infrastructures pourraient se révéler nécessaires pour maintenir l'irrigation dans les secteurs agronomiques clés, ainsi que de bonnes conditions de navigation fluviale (sur le Rhin ou le Danube), mais aussi pour préserver la sécurité des centrales nucléaires, qui exigent de grandes quantités d'eau

Cette stratégie visant à développer l'exploitation des eaux bleues et celles issues des stations de traitement des eaux « grises » – les eaux usées – (*via* le recyclage) implique des financements massifs. En France, sa mise en œuvre incombe aux Agences de l'eau, aux Établissements publics territoriaux de bassin ainsi qu'aux compagnies d'aménagement. L'aspect financier n'est pas la seule difficulté à laquelle ces institutions sont confrontées. Au-delà des activités de production et de consommation, l'évaluation de l'intérêt collectif de ces nouvelles infrastructures doit intégrer des considérations écologiques et environnementales. À ce titre, l'opposition suscitée depuis près de 30 ans à la construction d'un barrage à Charlas, en Midi-Pyrénées, illustre bien comment de tels projets sont susceptibles d'exacerber les conflits locaux.

Les projets d'aménagement sont en général soumis à des analyses qui mettent en balance les coûts de construction avec les bénéfices escomptés. La construction du barrage de la Renaissance sur le Nil Bleu, en Éthiopie, qui a commencé au printemps 2013, a fait l'objet d'une telle analyse coûts-bénéfices. Elle détaillait les aspects financiers (liés aux investissements ou au déplacement des populations), les risques sismiques ainsi que les bénéfices attendus en termes de production hydroélectrique et d'extension des surfaces irriguées. Ce type d'analyse constitue un outil d'aide à la décision, qui s'ajoute aux enquêtes d'utilité publique, aux rapports parlementaires et aux études de faisabilité. L'ensemble permet d'arrêter un arbitrage sur les différents scénarios envisagés : *statu quo*, lancement du projet ou aménagements alternatifs.

Cette forme d'adaptation n'en demeure pas moins limitée. L'irrigation ne résoudra pas toutes les difficultés auxquelles sera confrontée l'agriculture. Des prélèvements excessifs dans les nappes, les lacs ou les rivières peuvent conduire à leur disparition temporaire, à l'instar de la mer d'Aral, en Asie centrale, qui a perdu 90 pour cent de son volume entre les années 1960 et le milieu des années 2000. L'assèchement des systèmes hydriques s'accompagne souvent d'un dépérissement des écosystèmes terrestres et aquatiques, ainsi que de mouvements de terrain.

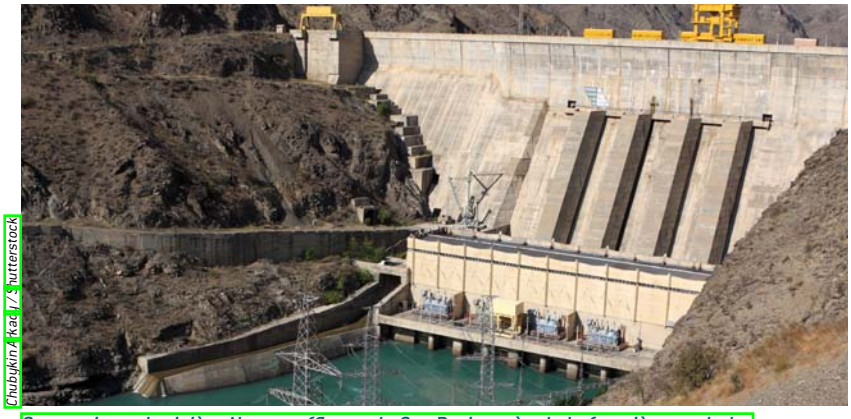
Outre les risques d'assèchement, ce type d'adaptation nous rend plus dépendants de la ressource et moins résilients aux extrêmes climatiques. Ainsi, les pouvoirs publics ont progressivement réalisé que la mobilisation de nouvelles ressources devait être associée à des mesures de régulation. Elles consistent, notamment, à limiter notre dépendance à l'égard de la ressource. Un des éléments clés est la compétition entre l'eau verte et l'eau bleue, puisqu'une consommation accrue de la première entraîne une diminution de la seconde – celle qui est distribuée dans les réseaux d'alimentation.

Réduire les consommations

Les systèmes de production agricole ont déjà commencé à évoluer pour que notre consommation d'eau diminue. Une première approche vise à modifier les périodes de semis ou de récolte, afin d'adapter les cultures à l'évolution des températures saisonnières. Une autre méthode vise, par exemple, à introduire des espèces moins gourmandes en eau, telles que le soja et le sorgho.

Plus généralement, l'agroécologie et son succédané le plus récent, l'agriculture écologiquement intensive, apparaissent comme des solutions prometteuses pour adapter l'agriculture aux changements globaux et répondre à une demande croissante en produits

de qualité. Ces approches systémiques s'appliquent à augmenter les productions tout en respectant la santé humaine et l'équilibre des écosystèmes. Elles s'appuient sur des fonctionnalités écologiques naturelles, telle la biodiversité au sein des cultures afin de limiter la prolifération des ravageurs. Un autre exemple d'agriculture écologiquement intensive consiste à effectuer des semis sur des sols non labourés présentant un couvert végétal permanent. Grâce à un système racinaire profond et puissant, ce couvert végétal fait remonter des nutriments vers la surface où ils sont utilisés par les cultures principales. Le ruissellement des eaux de pluie se trouve par ailleurs diminué. Une biomasse importante peut ainsi être produite avec de moindres quantités d'eau, pendant les saisons sèches notamment.



Chubykin A Kael / Shutterstock

Construit sur la rivière Naryn, affluent du Syr-Daria, près de la frontière ouzbek, le barrage de Taktogul est le plus grand du Kirghistan.

Une source de coopération plus que de conflits

La géopolitique de l'eau est souvent présentée comme une compétition entre pays pour une ressource considérée comme stratégique et source de conflits. Cette concurrence concerne des pays situés le long d'un cours d'eau ou partageant des ressources souterraines. Mais, au cours des 50 dernières années, grâce aux relations interétatiques, des solutions de coopération ont été trouvées dans la majorité des cas.

Ainsi, Ariel Dinar, de l'Université de Californie à Riverside, et Pradeep Kurukulasuriya, un des experts du Programme des Nations unies pour le développement, ont montré que la rareté structurelle de la ressource joue un rôle positif sur la coopération entre États. D'autres facteurs, tels que la bonne gouvernance et les échanges internationaux, pèsent souvent davantage que les caractéristiques géographiques. Par ailleurs, on constate que les accords de coopération incluent souvent d'autres aspects, notamment la production d'hydroélectricité, la protection contre les crues et le contrôle de la pollution.

L'accord sur le fleuve Sir-Daria concerne par exemple trois pays d'Asie centrale : en amont, le Kirghizistan ; et en aval, l'Ouzbékistan et le Kazakhstan. Dans le cadre d'un accord hérité du modèle soviétique, le pays en amont s'engage à fournir de l'électricité et de l'eau d'irrigation en échange du pétrole fourni par les pays en aval.

Il existe plus de 200 cours d'eau transfrontaliers dans le monde, dont certains font l'objet d'accords internationaux dans des contextes de raréfaction de la ressource. Leur stabilité pourrait être remise en cause par le changement climatique. Ainsi, en 2008, des économistes ont constaté que les accords de partage étaient d'autant plus solides que les débits moyens des cours d'eau étaient importants, et, inversement, que des débits fluctuant tendaient à exacerber les tensions. Il est donc essentiel de déterminer des règles de partage considérées comme équitables par les différents pays concernés, ainsi que des mécanismes de compensations adaptés aux évolutions économiques et climatiques.

Ces nouvelles pratiques peuvent néanmoins conduire à une compétition accrue pour la ressource en eau – comme dans l'agroforesterie, par exemple, où des plantations d'arbres sont associées à l'exploitation des terres agricoles. Pour les optimiser, il faut intégrer une série d'approches : agronomique, économique, hydrologique, sanitaire et environnementale. L'intégration est réalisée à l'aide de simulations numériques, qui permettent d'élaborer des scénarios d'évolution proposant une palette d'adaptations biotechniques. En plus de cette approche virtuelle, l'adaptation passe par l'implication des acteurs de terrain dans des dispositifs expérimentaux imaginés avec des agriculteurs, pour faire en sorte qu'ils s'approprient au mieux les évolutions en cours.

Pour favoriser une adaptation limitant notre dépendance à la ressource, diverses actions pourront être déployées, et certaines le sont déjà en Europe. Elles concernent le secteur résidentiel et les régions semi-arides en particulier. Ces actions comprennent des tarifications adaptées à la raréfaction de la ressource, des restrictions réglementaires, ainsi que des politiques de sensibilisation et d'aide aux investissements dans des équipements plus économes en eau.

Des études ont montré que la sensibilité des usagers à l'égard du prix de la ressource est souvent assez faible, mais que cette sensibilité augmente rapidement avec les coûts d'accès – et ce d'autant plus que leur niveau est couplé à des mesures de restriction. La clarté des informations fournies dans les factures d'eau se révèle par ailleurs particulièrement importante pour transmettre un message fort sur la rareté de la ressource. On constate aussi que l'anticipation des coûts d'accès croissants à l'égard d'une ressource qui se raréfie incite souvent les usagers à se munir d'équipements sanitaires et électroménagers plus économes en eau.

De même, les agriculteurs qui pratiquent l'irrigation devraient pouvoir

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

anticiper les scénarios climatiques, afin d'opter pour les systèmes de production les mieux adaptés. Et ce d'autant que, depuis 2006, les aides compensatoires européennes ont été uniformisées : elles ne favorisent plus les cultures irriguées à forts rendements, tel le maïs. Des cultures de substitution pourront donc plus facilement être développées. Toutefois, elles devront s'appuyer sur des filières territoriales ou d'exportation viables. Le maïs pourrait ainsi être remplacé par le sorgho pour l'alimentation animale, mais la filière française demeure encore mal structurée dans ce secteur.

Dan B. Pradek/Shutterstock

Bateau échoué près de Moynaq, un ancien port situé au Sud de la mer d'Aral, en Asie centrale. Ce lac d'eau salée s'est en partie asséché, car les fleuves qui l'alimentaient ont été utilisés pour l'irrigation.

Événements extrêmes

Quelle que soit la stratégie d'adaptation choisie, il nous faudra aussi nous adapter aux événements climatiques extrêmes, dont la fréquence et l'intensité augmenteront. Il existe deux grandes stratégies : éviter ou accepter. Pour faire face aux risques de crue, par exemple, les stratégies d'évitement consistent à fabriquer des bassins de rétention en amont des cours d'eau ; dans les zones urbaines, on pourrait utiliser des matériaux poreux (graviers ou bitumes drainant) pour les trottoirs et les chaussées, valoriser la récupération des eaux de pluie, créer des zones d'expansion de crue (ce qui permet d'éviter les crues en aval, mais nécessite la submersion de terres agricoles en amont).

L'adaptation aux sécheresses passe par la réduction de la dépendance, mais aussi par la création de ressources de sécurité (barrages), ou des méthodes de recharge artificielle des nappes, l'eau ainsi stockée pouvant être utilisée en période critique (une telle possibilité est à l'étude pour le bassin de la Seine).

Quant aux stratégies d'acceptation, elles visent à adapter le milieu urbain aux inondations de certains quartiers, ce qui se traduirait par des constructions sur pilotis (par exemple au Bangladesh) ou des habitations « flottantes » (comme aux Pays-Bas), et à inciter les agriculteurs à renoncer à certaines parcelles pour favoriser les plus résilientes. Il faudra prévoir des types adaptés d'assurances dédiées aux agriculteurs, qui remplaceront progressivement les fonds de compensation. Des dispositifs publics de réassurance seront nécessaires étant donné les montants en jeu.

Précisons que l'adaptation aux sécheresses passe souvent par des restrictions d'usage. Ces dernières doivent être appliquées de façon uniforme sur une même zone géographique ou administrative, mais différenciées selon les usages – les usages résidentiels demeurant la priorité. Enfin, évoquons un dernier mécanisme d'adaptation : la gestion concertée de l'eau au niveau local, le plus souvent par des collectifs d'agriculteurs. Fondés sur des règles de partage de la ressource décidées collectivement, ces systèmes sont souvent mieux acceptés que les mesures tarifaires, mais ne résisteraient pas si l'eau venait à manquer.

Ces efforts de concertation ne se réduisent pas aux situations extrêmes. Une adaptation durable ne pourra se construire, en effet, qu'à la faveur d'une vision territoriale des ressources et des besoins en eau. Cette approche a l'agrément de l'ensemble des acteurs et vaut pour les différents problèmes : approvisionnement en eau potable, agriculture, industrie, contraintes énergétiques et préservation des écosystèmes.

Le bassin-versant – une région où toutes les eaux convergent vers un même exutoire – est l'unité territoriale la mieux adaptée à cette réflexion collective. Dans ce cadre, il s'agit de privilégier l'usage des sols qui présentent les meilleures capacités d'adaptation et de résilience. Cette approche conduira au développement d'outils de gestion capables d'intégrer les considérations agronomiques et hydrologiques à différentes échelles.

La ressource en eau étant source de conflits *(voir l'encadré page ci-contre)*, ces adaptations devront intégrer la notion d'équité entre les acteurs concernés. La gestion par bassin-versant devra s'attacher à une gestion solidaire entre bassins voisins, sans oublier que les aménagements ont des impacts non seulement locaux, mais aussi à grande échelle sur les écosystèmes fluviaux, côtiers et marins.

Bibliographie

M. Chauveau et *al.*, *Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ?*, *La Houille Blanche*, n°4, pp. 5-15, 2013.

S. Ambec et *al.*, *Water Sharing Agreements Sustainable to Reduced Flows*, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 66, pp. 639-655, 2013.

Site internet sur le projet *Explore 2070* : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-des-strategies-d.html

Vers une écologie de la santé

Olivier Plantard est chargé de recherche dans l'Unité mixte de recherche INRA - Oniris Biologie, épidémiologie et analyse de risque en santé animale, à Nantes.

Laurent Huber est directeur de recherche dans l'Unité mixte de recherche INRA - AgroParisTech Environnement et grandes cultures, à Grignon.

Jean-François Guégan est directeur de recherche dans l'UMR IRD-CNRS, Université de Montpellier I et II, Maladies infectieuses et vecteurs : écologie, génétique, évolution et contrôle, et Laboratoire d'Excellence CEBA.

La santé est soumise à divers aléas, notamment climatiques. Pour gérer la santé de demain, il est urgent de concevoir des modèles intégrant les variables du climat, les caractéristiques des écosystèmes où se développent les maladies… sans oublier l'être humain !

Climat et santé sont liés. La santé humaine, mais aussi la santé végétale ou la santé animale sont soumises à la saisonnalité. Si le climat change, la saisonnalité des maladies devrait également évoluer. Dès lors, se pose la question des conséquences sanitaires du changement climatique. Sont-elles toujours négatives, comme certains articles ou reportages alarmistes le laissent penser ? La situation est complexe, donc forcément plus nuancée. Certes, des événements météorologiques extrêmes, tels que les canicules, les inondations ou les tempêtes violentes, se feront plus intenses et plus fréquents dans les années à venir, et pourraient entraîner une hausse de la mortalité et une baisse de l'efficacité des systèmes sanitaires.

Néanmoins, cet impact reste difficile à estimer, car on ne sait pas prévoir la fréquence de ces événements qui resteront rares. Une autre conséquence attendue du changement climatique sur la santé concerne la modification des risques environnementaux, *via* une exposition accrue aux rayonnements ultraviolets ou à des polluants atmosphériques, tels que l'ozone. Certains effets seront néfastes, mais d'autres pourraient se révéler positifs en faisant disparaître, par endroits, des virus, des bactéries ou des champignons parasites. Là encore, l'impact général, peu étudié, demeure incertain.

Déclenchement des épidémies

Depuis une vingtaine d'années, les recherches concernant les conséquences sanitaires du changement climatique ont porté principalement sur les maladies infectieuses, du fait de la multiplicité des facteurs intervenant dans le déclenchement d'une épidémie et de l'intérêt que les écologues, entomologistes et zoologistes manifestent pour ce sujet.

Comme nous l'avons souligné, les systèmes sont complexes, car ils présentent de nombreuses interactions. Commençons par des systèmes biologiques simples, où deux espèces en interaction, l'hôte et l'agent pathogène, évoluent dans un écosystème naturel. Simplifions encore en considérant les hôtes dont la température corporelle n'est pas régulée – à l'instar des plantes, insectes, reptiles ou poissons –, et qui sont, par conséquent, très sensibles aux conditions météorologiques ambiantes et à leur évolution.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

Dans le cas de l'encre du chêne, maladie infectieuse due à un champignon parasite, le réchauffement climatique semble bien responsable de la progression de cette maladie chez certaines espèces d'arbres, par exemple le chêne rouge d'Amérique et le chêne pédonculé. Au moyen de simulations numériques, permettant de modéliser la survie hivernale de l'agent pathogène en fonction de la température de son microhabitat (le phloème des arbres infectés, c'est-à-dire le tissu qui conduit un type de sève), des chercheurs de l'INRA et de Météo-France ont établi que ce champignon devrait se déplacer progressivement vers l'Est de la France, entraînant un accroissement du potentiel d'expansion de cette maladie sur la majorité du territoire d'ici la fin du XXIe siècle.

Au contraire, d'autres travaux ont mis au jour une influence favorable du changement climatique sur la santé des plantes. C'est le cas d'une étude réalisée dans le cadre du projet *Climator* (2007-2010) sur trois maladies affectant des cultures annuelles : la septoriose du blé, la rouille brune du blé et le botrytis de la vigne – causées par des champignons pathogènes également. Des modèles numériques prenant en compte l'évolution de la température et du taux d'humidité de l'air ont permis d'estimer la durée au cours de laquelle de l'eau est présente à la surface des feuilles de blé, notamment. En effet, l'infection par le micro-organisme responsable de la maladie de la rouille brune requiert la présence d'eau liquide sur les feuilles pendant une durée minimale qui dépend de la température.

Pour les régions de Dijon et de Colmar, les simulations indiquent que la durée des périodes où l'infection sévit devrait diminuer d'environ 30 pour cent d'ici la fin du siècle, ce qui conduirait à une baisse des risques d'infection du blé par les spores de la rouille brune. Toutefois, pour connaître précisément la durée des infections, il faudrait considérer aussi l'influence du changement climatique sur la dynamique des cultures, ainsi que l'avancée prévisible des dates de semis, ce qui n'a pas encore été réalisé. Même si ces travaux préliminaires sont encourageants, ils demandent à être confortés et élargis à d'autres maladies fongiques dont souffrent les cultures.

Citons maintenant un exemple chez l'animal, l'huître de Virginie, implantée sur les côtes atlantiques d'Amérique du Nord. Son évolution confirme le lien simple et direct entre le changement climatique et le développement d'une épidémie. Ainsi, l'élévation de la température des eaux de surface a favorisé la survie hivernale d'un parasite responsable d'une maladie infectieuse, la perkinsose : depuis la fin des années 1940, l'aire de répartition de cette maladie a progressé de plus de 500 kilomètres vers le Nord.

Le rôle de la température

En termes d'impact du changement climatique, les experts s'accordent à dire que les variations de température joueront un rôle important sur le développement des maladies infectieuses. En influant sur le métabolisme des parasites et des organismes hôtes, ces variations conditionnent les vitesses de développement et, par conséquent,

Les campagnes de vaccination contre la grippe, qui touche plusieurs millions de Français chaque hiver, ont permis de diminuer notablement le nombre de décès de personnes fragiles.

Le paradoxe de la mortalité hivernale

En France, la canicule de 2003 a entraîné la mort d'environ 15 000 personnes, sans compter ses conséquences sur les écosystèmes et les infrastructures. Malgré cet épisode, le taux de mortalité dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord est beaucoup plus élevé en hiver que durant toute autre saison.

Selon une revue réalisée en 2012 par Patrick Kinney et ses collègues de l'Université Columbia, à New York, on meurt généralement plus en hiver dans les pays tempérés, telle la France. Dans un contexte de hausse globale des températures, cette mortalité hivernale pourrait même augmenter au sein des populations qui vivent dans les pays chauds. Pour expliquer ces effets encore mal compris, on évoque, tour à tour, des complications cardio-vasculaires, mais aussi inflammatoires après des infections respiratoires, comme c'est le cas avec la grippe.

Avant toute généralisation, précisons qu'il existe d'importantes disparités géographiques globales et locales dans les manifestations de cette mortalité hivernale. Par ailleurs, les chercheurs ne disposent que d'un petit nombre de données écologiques et épidémiologiques fiables, qui seraient pourtant indispensables pour prévoir les conséquences sanitaires du changement climatique, identifier les populations les plus vulnérables et définir les mesures de prévention et d'adaptation les mieux adaptées.

interviennent sur l'expansion ou la diminution des aires de répartition.

La température est plus facile à utiliser que d'autres variables physiques pour tester des scénarios de changement climatique. Cette variable d'état ne dépend pas de l'étendue du système considéré, et connaît des fluctuations beaucoup moins rapides que celles de la pluie, variable de flux cumulative. Par ailleurs, la température influe sur la vitesse de tout processus biologique, alors que la pluie agit plus spécifiquement, par exemple, sur l'infection fongique des plantes et la dispersion des spores et bactéries.

Même s'il est admis que la fréquence des événements extrêmes va augmenter, par exemple la fréquence des épisodes pluvieux de longue durée, le caractère intermittent de la pluie et les incertitudes sur les données à l'échelle de la journée rendent difficile l'obtention d'une répartition de la pluie par heure. C'est un enjeu pour la recherche météorologique, car il nous faut parfois ces données à une échelle temporelle très inférieure à la journée. Les sécheresses estivales plus longues constituent d'autres événements extrêmes, qui pourraient limiter, voire arrêter, la progression de mycoses fongiques transmises par l'air ou dans le sol, notamment chez les plantes-hôtes qui résisteront à la sécheresse.

Damian Lyzc / Shutterstock

Causée par un champignon pathogène, la maladie de la rouille brune du blé se manifeste à la surface des feuilles par de petites pustules orangées contenant des spores.

Les maladies et leurs vecteurs

Examinons à présent le cas des maladies à transmission vectorielle, telles que le paludisme, la dengue ou la fièvre jaune. Ces systèmes infectieux plus complexes se propagent d'un individu hôte à un autre par l'intermédiaire de vecteurs, de petits arthropodes qui se nourrissent de sang : moustiques, moucherons, poux, punaises, tiques, etc. Chez l'homme, les maladies vectorielles sont responsables de près d'un quart des épidémies émergentes recensées dans le monde. Puisque les vecteurs ne régulent pas leur température interne, les conditions météorologiques conditionnent leur développement, leur survie, leur fécondité et leur dispersion. Elles déterminent aussi la croissance du parasite et, dans une moindre mesure, les interactions du vecteur et de son agent pathogène, ainsi que du vecteur et de l'hôte.

Dans le contexte actuel du changement climatique, les maladies vectorielles sont observées avec attention par les épidémiologistes. Dans l'hémisphère Nord, la répartition de certains vecteurs, telle la tique *Ixodes ricinus*, est d'ores et déjà modifiée. Vectrice de nombreuses maladies, la maladie de Lyme et l'encéphalite à tique notamment, cette tique a progressé vers le Nord de la Suède. En 16 ans, l'aire de la zone où elle est présente a doublé *(voir l'illustration page ci-contre)*.

Le changement climatique influe aussi sur la répartition des espèces « réservoirs » qui hébergent l'agent pathogène. Ainsi, en Amérique du Nord, l'aire de répartition de la souris à pattes blanches, principal réservoir de la bactérie *Borrelia burgdorferi* responsable de la maladie de Lyme, a progressé de 10 kilomètres par an vers le Nord.

Depuis les années 2000, la prédiction des changements d'aires de répartition des vecteurs est devenue un champ de recherche particulièrement actif, grâce à l'essor de la modélisation des niches écologiques, décrites par un ensemble de paramètres biologiques et physico-chimiques. Cependant, bien que la présence d'un vecteur soit indispensable à la diffusion de ce type de maladies, elle ne constitue pas une condition suffisante pour qu'une épidémie se développe. Même si le rôle direct du changement climatique est en cause dans les modifications des aires de répartition de certains vecteurs, il est difficile de mettre en évidence son rôle dans l'augmentation de la prévalence de ces maladies dans des régions où elles étaient déjà présentes.

Le rôle de l'homme

La situation se complique encore quand on tient compte des activités humaines. La fièvre catarrhale ovine, ou maladie de la langue bleue, illustre les liens complexes et parfois trompeurs entre le changement climatique et la propagation d'une épidémie. La fièvre catarrhale touche les ruminants, mais pas l'homme. Cette maladie vectorielle est causée par un virus, qui est lui-même transmis par des petits moucherons piqueurs du genre *Culicoides*. Des épidémies de fièvre catarrhale étaient recensées en Afrique du Nord, où le virus était véhiculé par une variété de moucherons *(Culicoides imicola)*, dont la présence n'avait jamais été enregistrée sur le continent européen.

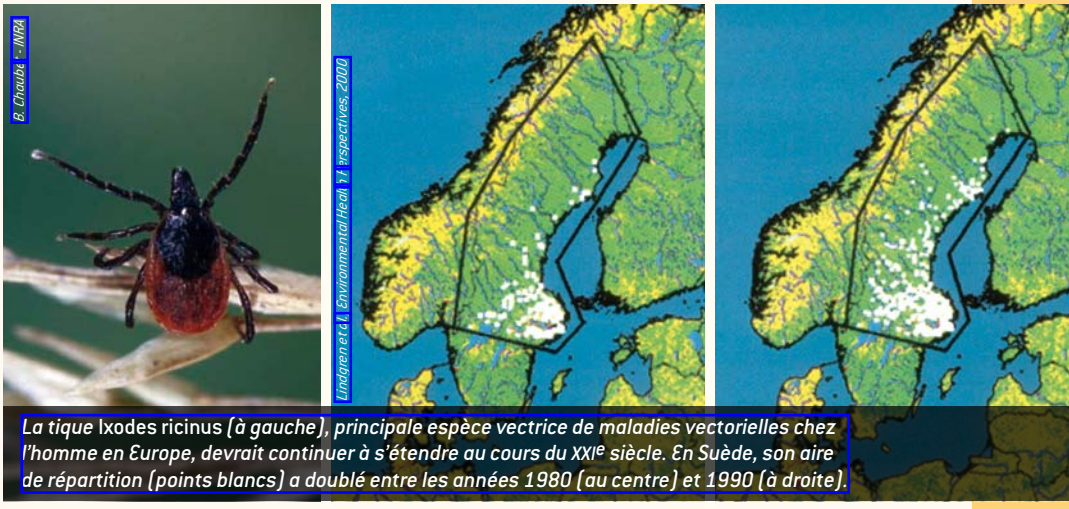
Or, dans les années 1980 et 1990, cette espèce a été détectée de plus en plus au Nord de son aire de répartition connue : en Italie, Sardaigne,

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

Corse, puis dans le Sud de la France. En Europe, on redoutait ainsi qu'une épizootie (épidémie animale) n'arrive par le Sud. Mais c'est aux Pays-Bas qu'elle s'est finalement manifestée, en août 2006. En quelques années, l'épizootie s'est propagée à une vitesse de cinq kilomètres par jour dans toutes les directions, causant des dommages économiques importants dans les élevages ovins et bovins d'Europe de l'Ouest : avortements, baisse de la production de lait et de viande, campagnes massives de vaccination, restriction des échanges commerciaux, etc.

En raison de la localisation du foyer d'origine, des directions qu'elle a suivies et du virus qui l'a causée (BTV8, une forme virale différente de celle présente en Afrique du Nord), cette épizootie présente une dynamique qui ne peut être directement reliée au changement climatique. Par la suite, on s'est d'ailleurs aperçu que les moucherons impliqués dans la transmission du BTV8 correspondaient non pas à *Culicoides imicola*, mais à d'autres espèces, qui auparavant n'étaient pas considérées comme des vecteurs efficaces. Des études génétiques ont également établi que les moucherons détectés dans le Sud de l'Europe s'y trouvaient depuis longtemps. Ainsi, l'apparente progression des *Culicoides* vers le Nord de l'Europe est surtout imputable à une augmentation des efforts de surveillance et de recherche pour les trouver, c'est-à-dire à une meilleure connaissance de leur répartition géographique.

Le changement climatique n'est pas totalement hors de cause pour autant. Une analyse croisée de l'évolution des conditions climatiques depuis les années 1960 et d'un modèle décrivant la dynamique des vecteurs et des organismes hôtes de cette maladie a montré que l'été 2006 correspondait à une période de risque maximal pour le déclenchement d'une épidémie dans le Nord-Ouest de l'Europe. Et, au-delà des facteurs climatiques qui ont favorisé la transmission du virus, tout porte à croire que son introduction est liée aux activités humaines telles que l'importation (illégale ou accidentelle) d'animaux ou de vecteurs. Cet exemple montre à quel point il est parfois difficile de séparer la part du changement climatique et celle d'autres évolutions où les activités humaines occupent un rôle central : transferts de populations ou de marchandises d'origines animale et végétale, changement d'usage des sols, auxiliaires de culture qui détruisent les ravageurs, baisse de la biodiversité touchant les espèces réservoirs et les prédateurs, etc.



La tique Ixodes ricinus *(à gauche), principale espèce vectrice de maladies vectorielles chez l'homme en Europe, devrait continuer à s'étendre au cours du XXIe siècle. En Suède, son aire de répartition (points blancs) a doublé entre les années 1980 (au centre) et 1990 (à droite).*

Les principales causes d'émergence

Parmi la multitude de publications scientifiques et institutionnelles qui se sont efforcées de mettre en lumière l'impact du changement climatique sur la santé humaine, les travaux de Mark Woolhouse et de Sonya Gowtage-Sequeria, du Centre des maladies infectieuses de l'Université d'Édimbourg, en Écosse, sont particulièrement intéressants. En réunissant une base de données très complète, ils ont classé les principales causes d'émergence et de dispersion de 177 agents infectieux apparus depuis les années 1960. Leurs conclusions battent en brèche une idée reçue : le changement climatique ne joue pas un rôle déterminant dans l'émergence de nouvelles maladies infectieuses, bien au contraire. Dans le classement que ces épidémiologistes ont établi, il apparaît comme le dernier facteur, du moins en 2005, date où ce travail a été publié !

L'évolution génétique naturelle des micro-organismes y occupe la cinquième place. À titre d'exemple, rappelons que la mutation du virus du Chikungunya, qui s'est produite en septembre 2005 à La Réunion, a déclenché une épidémie de grande envergure qui a frappé plus de 300000 habitants des îles de l'océan Indien. Les changements démographiques, sociétaux et comportementaux (les pratiques à risque, notamment) figurent à la deuxième place.

En se fondant sur des modèles de niches écologiques, une étude récente sur la transmission de la dengue a ainsi montré que son expansion était principalement due aux densités élevées de population, aux conditions d'insalubrité ainsi qu'aux réseaux de transport humains. Enfin, au premier rang, se situent les changements d'usage des sols ainsi que les pratiques agricoles et agronomiques. Par ses activités, par ses comportements et par ses modes d'organisation socio-économique, l'homme est le principal responsable de l'apparition et de l'expansion des nouveaux agents pathogènes.

Pour illustrer le rôle des changements des conditions socio-économiques sur la prévalence de certaines pathologies, revenons sur le cas des maladies vectorielles transmises par les tiques.

La prévalence de l'encéphalite à tique a augmenté dans les pays baltes à partir du début des années 1990. Contrairement à la maladie de Lyme, qui n'a jamais fait l'objet d'un recensement systématique, l'encéphalite à tique a été très bien répertoriée depuis une quarantaine d'années, offrant ainsi des données de qualité. Or, dans chacun des pays baltes étudiés (Lituanie, Lettonie, Estonie), on a observé une grande hétérogénéité des variations de la prévalence d'une année à l'autre entre cantons. Cela suggère que le changement climatique – qui se produit de façon relativement homogène sur de vastes zones – n'est pas le seul en cause.

Sarah Randolph et Dana Sumilo, de l'Université d'Oxford, ont montré que le changement climatique – avec une augmentation de la moyenne annuelle des températures maximales (passant de 10 à 11 °C) entre 1988 et 1990 – constitue un des facteurs en cause, mais ne peut pas expliquer l'hétérogénéité observée dans l'espace et dans le temps. Elles avancent l'hypothèse suivante : la recrudescence de l'encéphalite à tique observée durant cette période résulterait de la transition socio-économique que les pays baltes ont connue au début des années 1990 en sortant du communisme.

À cette époque, de nombreux habitants de ces pays ont augmenté leur risque d'exposition au vecteur de la maladie en fréquentant davantage les forêts : les populations les plus pauvres, en s'efforçant de trouver des revenus ou des ressources complémentaires *via* la cueillette de champignons et de baies ; mais aussi les plus riches, en raison d'un accès accru aux activités de loisir, dans les campagnes notamment. L'abandon des fermes collectives a aussi entraîné des modifications dans l'utilisation des sols (des mises en jachère, par exemple), qui auraient favorisé la propagation de ces maladies où les faunes sauvages et domestiques interagissent étroitement.

À travers tous ces exemples, on mesure combien l'impact du changement climatique sur les maladies infectieuses est complexe, variable et difficile à étudier. D'une part, il est lié à de multiples acteurs : agents pathogènes, organismes hôtes, vecteurs de transmission, espèces réservoirs et interventions humaines. D'autre part, il est soumis à plusieurs variables physiques telles que la température, l'humidité de l'air, le vent et les précipitations, dont l'évolution doit être estimée par l'analyse de leurs valeurs moyennes, mais aussi de leurs valeurs extrêmes, et plus généralement de leur variabilité durant telle ou telle période.

Tous ces paramètres sont souvent interdépendants, et les relations qu'ils entretiennent avec la prévalence des maladies infectieuses ne sont pas toujours linéaires (les paramètres et la prévalence ne varient pas dans les mêmes proportions). Les échelles spatiales et temporelles permettant d'analyser ces maladies sont par ailleurs très variables : de quelques centimètres carrés pour la dispersion des spores par la pluie, à une échelle planétaire quand il s'agit de l'évolution du climat global. Cela pose d'épineux problèmes de changement d'échelles, car certaines propriétés dites émergentes ne sont observables qu'à des niveaux d'intégration supérieurs. Ces propriétés n'apparaissent que si l'on se place à l'échelle des populations ou à celle des écosystèmes, par exemple, mais ne sont pas perceptibles quand on étudie les individus séparément. Enfin, les systèmes responsables de maladies ne sont ni fixes ni constants au cours du temps, car chacun des acteurs évolue en raison des modifications de la composition génétique des populations sous l'effet des différentes pressions de sélection exercées par les interactions des hôtes avec les agents pathogènes, ou par l'environnement, dont une des facettes est le climat.

L'écologie de la santé

C'est pourquoi un cadre plus large, associant écologie et biologie évolutive, a été proposé pour étudier ces questions complexes. À côté de l'approche *One Health/One World*, prenant peu en compte l'environnement, citons l'approche *EcoHealth* qui met en avant « le partage des responsabilités et la coordination des actions globales pour gérer les risques sanitaires aux interfaces animal-homme-écosystèmes » et l'im-

Principales causes d'apparition des nouveaux agents infectieux

Rang	Facteurs d'émergence	Exemples
1	Changements d'usage des sols, pratiques agricoles et agronomiques	Virus Nipah en Asie du Sud-Est, ESB
2	Changements démographiques, sociétaux et comportementaux	Coqueluche, VIH, syphilis
3	Précarité des conditions sanitaires	Choléra, tuberculose
4	Liés à l'hôpital (nosocomiaux) ou à des erreurs de soins et de pratiques	*Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*
5	Évolution des agents pathogènes (Chikungunya, antibiotiques, mutations…)	A/H1N1, H5N1
6	Contamination par les aliments ou l'eau	*E. coli*, ESB, *Salmonella*
7	Voyages et échanges intercontinentaux	Dengue, grippe saisonnière, H5N1
8	Désorganisation des systèmes de santé et de surveillance	Maladie du sommeil en Afrique centrale, maladies à tiques et tuberculose, ex-URSS
9	Transports de biens et d'animaux	Virus *Monkeypox*, H5N1, *Salmonella*…
10	Changement climatique	Paludisme en Afrique de l'Est, dengue en Asie du Sud-Est, leishmaniose viscérale dans le Sud de l'Europe (forte suspicion)

Ce classement a été réalisé à partir de 177 agents pathogènes responsables de maladies infectieuses émergentes touchant les populations humaines depuis les années 1960

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

portance du « renforcement des collaborations entre santé humaine, santé animale et gestion de l'environnement ». Il s'agit d'élargir le champ d'analyse, traditionnellement centré sur la santé des individus, en considérant les modifications des écosystèmes, l'influence des changements planétaires (climatiques notamment) et la perte de diversité biologique, avec toutes leurs interactions directes et indirectes.

L'écologie de la santé traduit une prise de conscience du partage des responsabilités et de la nécessité de renforcer les actions communes concernant la santé humaine, la santé animale et végétale, et la gestion de l'environnement. Cette approche intégrative permet d'éviter l'erreur qui consiste à isoler artificiellement l'effet du changement climatique d'autres modifications dues à l'homme, et impliquées elles aussi dans le développement d'épidémies (changement d'utilisation des sols, introduction d'espèces invasives liée aux déplacements humains ou au transport de marchandises, par exemple).

Dans le domaine animal et le domaine végétal, les conséquences sanitaires du changement climatique restent largement inexplorées, ce qui explique le lancement, début 2014, de nouveaux programmes de recherche par l'Agence nationale de la recherche et la Commission européenne. Dans ce cadre, l'augmentation de la résilience des écosystèmes, le rôle de la biodiversité et le développement d'une approche transdisciplinaire et participative (associant chercheurs, entreprises, agriculteurs, gestionnaires, etc.) figurent parmi les thématiques mises en avant dans plusieurs grands programmes de recherche.

Anticiper les évolutions

Dans le domaine végétal en particulier, les objectifs majeurs ont trait à la réduction de l'usage des pesticides et à la préservation des cultures face au réchauffement climatique. Une autre problématique importante a émergé : les rétroactions de la santé des plantes sur le climat. Une culture fortement atteinte, voire détruite, par une épidémie importante émet davantage de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, à cause du dépérissement des plantes et d'une minéralisation plus forte des matières organiques contenues dans les sols.

Étant donné la complexité des phénomènes considérés, la modélisation représente un outil incontournable. Elle permet de se projeter dans le futur et d'établir des scénarios susceptibles de gérer et d'anticiper au mieux les évolutions attendues. Mais, pour être pertinents, précis et informatifs, les modèles doivent pouvoir se fonder sur des données de qualité et de longues séries temporelles et spatiales, ce qui fait actuellement défaut dans la recherche française, qu'elle ait lieu en France ou dans les pays tropicaux.

Pour les maladies infectieuses humaines, telles que le tétanos, l'anthrax et la légionellose, où l'agent pathogène peut persister dans l'environnement en l'absence de son hôte, il est impossible de conclure de façon certaine à l'absence totale de l'agent infectieux dans un endroit donné. Dès lors, la surveillance sanitaire ne permet pas – ou très difficilement – de répondre aux interrogations sur l'influence du changement climatique en particulier, car cela nécessite de comparer des situations où la maladie est présente et d'autres où elle est absente.

Les dispositifs de suivis de longue durée, du type *Long Term Ecological Research Network* (réseau de recherche écologique sur le long terme) sont particulièrement précieux. Ils devraient bientôt intégrer des recherches épidémiologiques relatives aux effets du changement climatique sur les maladies humaines, animales et végétales, ce qui permettra d'améliorer la précision des modèles numériques.

Enfin, insistons sur le fait que l'identification et la quantification des effets des changements globaux sur la santé représentent un défi qui ne pourra être relevé que si climatologues, épidémiologistes, modélisateurs, écologues, entomologistes, microbiologistes, parasitologues, immunologistes, socio-économistes, entre autres, travaillent ensemble sur un projet intégré.

mrfizah/Sutterstock

Les moustiques du genre Aedes propagent le virus du chikungunya d'un individu à un autre en les piquant. Cette maladie tropicale est également nommée « maladie de l'homme courbé », car elle provoque de très fortes douleurs articulaires associées à une raideur musculaire.

Bibliographie

C. Leport et J.-F. Guégan, *Les maladies infectieuses émergentes. État de la situation et perspectives*, La Documentation française, 2011.

N. Brisson et F. Levrault (éd.), *Le Livre Vert du projet Climator*, ADEME, 2010.

K. Smith et J.-F. Guégan, *Changing Geographic Distributions of Human Pathogens*, *The Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, vol. 41, pp. 231-250, 2010.

M. Delavière et J.-F. Guégan, *Les effets qualitatifs du changement climatique sur la santé en France – Rapport de Groupe interministériel*, La Documentation française, 2009.

K. Lafferty, *The Ecology of Climate Change and Infectious Diseases*, *Ecology*, vol. 90, pp. 888-900, 2009.

Comment gérer les flux migratoires ?

François Gemenne est chercheur en science politique, CEARC – UVSQ / CEDEM - ULg, expert associé et enseignant au CERI - Sciences Po.

Yann Mahé Kay/Shutterstock

Des zones littorales inondées ; des épisodes de sécheresse intenses. Il faudra aider les régions d'accueil à gérer la pression démographique due aux populations poussées à l'exode.

Les catastrophes naturelles imposant déplacements, exodes et évacuations ont été innombrables au cours des siècles. Le tremblement de terre qui détruisit Lisbonne en 1755, ou le grand incendie qui ravagea Londres en 1666, ont entraîné d'importants flux de réfugiés. Aux États-Unis, en 1927, l'inondation du delta du Mississippi déplaça 700 000 habitants, avant que la sécheresse du Dust Bowl et les tempêtes de poussière qui ont caractérisé cet épisode catastrophique des années 1930 ne poussent plus d'un million d'habitants des Grandes Plaines à migrer vers la Californie. Pendant longtemps pourtant, académiques comme décideurs ont considéré que les facteurs susceptibles d'entraîner des migrations – volontaires ou forcées – étaient avant tout d'ordre politique ou économique.

Aujourd'hui, le lien de causalité entre les dégradations de l'environnement et la décision migratoire est transformé par le changement climatique : à la fois parce que les mouvements de populations liés aux transformations de l'environnement sont appelés à prendre une ampleur sans précédent, mais également – et peut-être surtout – parce que le changement climatique pose la question de la responsabilité de ces déplacements. Alors qu'on invoquait auparavant la fatalité des catastrophes naturelles, la responsabilité des États industrialisés est désormais directement en cause.

On sait encore peu de chose, pourtant, quant à la façon dont les populations réagissent à la dégradation de leurs habitats. Si le phénomène des « migrations environnementales » n'est pas nouveau, ce n'est que récemment que le concept a émergé dans les milieux académiques et *a fortiori* politiques. Cette émergence a été concomitante de celle du changement climatique dans les cénacles internationaux. S'il est difficile de prévoir l'ampleur des flux migratoires engendrés par le changement climatique, il est néanmoins possible d'identifier ses principaux impacts sur les établissements humains. Le changement climatique, en effet, n'est pas un changement uniforme et aura des conséquences diverses.

Les populations vulnérables : les plus touchées

On distingue généralement trois types d'impacts du changement climatique sur les flux migratoires : l'intensité accrue des catastrophes naturelles, la hausse du niveau des mers et la raréfaction des ressources d'eau potable – aussi appelée stress hydrique. Ces trois types de changements ne produiront pas des migrations similaires, et n'appellent pas des stratégies d'adaptation identiques.

En premier lieu, le changement climatique se traduira par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles : les inondations seront plus nombreuses, et les ouragans plus violents. Au cours des dernières années, le nombre de catastrophes naturelles a déjà augmenté de façon significative, en premier lieu à cause de la plus grande vulnérabilité des populations exposées : une catastrophe n'est jamais purement naturelle, mais résulte de la rencontre d'un risque naturel et d'une population vulnérable. Les catastrophes naturelles touchent particulièrement les pays du Sud, et l'Asie est de loin le continent le plus concerné. On a longtemps imaginé que les catastrophes naturelles ne provoquaient pas de flux migratoires, mais plutôt des déplacements temporaires de population.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

Depuis l'ouragan Katrina, on sait que cette affirmation est fausse : un peu moins de la moitié de la population de La Nouvelle-Orléans n'est jamais revenue dans la ville. Les déplacements provoqués par les catastrophes naturelles n'offrent pas toujours la possibilité d'un retour dans la région d'origine.

Des conséquences peu prévisibles

Un autre impact du changement climatique sera la hausse du niveau des mers, provoquée à la fois par l'expansion thermique des océans et la fonte des calottes glaciaires. On estime ainsi que le niveau des océans montera d'environ un mètre d'ici 2100, même si des variations régionales se produisent. Or les régions côtières et des deltas comptent parmi les plus densément peuplées : de nombreuses métropoles y sont installées, et seront directement menacées d'inondation si des mesures d'adaptation ne sont pas prises (digues, restauration des littoraux, etc.). Les petits États insulaires sont également particulièrement vulnérables à toute hausse, même faible, du niveau des mers. Potentiellement, si des mesures d'adaptation importantes ne sont pas prises rapidement, les populations des régions de faible élévation pourraient être contraintes, à terme, de se déplacer.

Enfin, le changement climatique se traduira aussi par une raréfaction des ressources en eau potable : il s'agit sans nul doute d'un de ses impacts les moins directement visibles, mais parmi les plus dévastateurs. Cette raréfaction des ressources en eau résultera de trois facteurs concomitants : les nappes phréatiques seront contaminées par l'eau de mer ; la désertification s'intensifiera dans de nombreuses régions ; enfin, en raison de la fonte des glaciers, les ressources en eau douce diminueront.

Les effets du stress hydrique sur les mouvements migratoires sont difficiles à prévoir : plusieurs études ont ainsi montré que les migrations ont tendance à diminuer pendant les périodes de sécheresse. On peut néanmoins émettre l'hypothèse que des manques d'eau de longue durée pousseraient à l'exil les populations touchées.

Les termes de réfugiés environnementaux, ou de réfugiés climatiques, sont trompeurs, car les populations contraintes à se déplacer à cause des changements de l'environnement ne sont pas considérées comme des réfugiés, au sens de la Convention de Genève de 1951. Si celles qui se déplacent à l'intérieur de leur pays sont normalement couvertes par les principes directeurs relatifs aux déplacements internes, adoptés par les Nations unies en 1998, celles qui se déplacent à l'extérieur de leur pays ne sont couvertes par aucun statut juridique.

Si la protection juridique de ces migrants reste, pour une large part, encore à construire, les différentes politiques d'adaptation s'imposent aujourd'hui comme la variable déterminante des flux migratoires à venir. Même si elles restent imparfaitement définies, ces politiques d'adaptation peuvent prendre des formes diverses, telles que renforcement des digues, transformation de l'habitat, diversification de l'économie, réorganisation des pratiques agricoles, etc.

Le développement de stratégies d'adaptation dans les régions d'origine sera le seul moyen de limiter l'ampleur des flux migratoires. Dans bien des cas, la migration sera l'option ultime, qui ne sera envisagée que dans l'hypothèse où les différentes stratégies d'adaptation auront échoué.

Toutefois, l'adaptation ne saurait être réservée à la région d'origine : les migrations, surtout quand elles sont soudaines et massives, entraînent une pression démographique accrue sur les ressources de la région de destination. Ces ressources ne concernent pas uniquement l'accès à la nourriture ou à l'eau potable, mais aussi l'emploi ou le logement. Les régions de destination sont généralement pauvres et souvent incapables de faire face à des afflux de migrants. Ce n'est qu'en développant des mesures d'adaptation que les régions d'accueil des migrants pourront faire face à une pression démographique accrue.

Enfin, la migration elle-même, loin de représenter un échec de l'adaptation, peut aussi, dans certains cas, être développée comme une stratégie d'adaptation à part entière. Dans ce cas, le choix migratoire sera délibéré, et permettra aux migrants de réduire leur vulnérabilité aux impacts du changement climatique, tout en relâchant la pression démographique dans leur région d'origine. Ces stratégies peuvent être efficaces dans les cas de dégradations progressives de l'environnement, et notamment dans des situations de désertification. L'enjeu politique sera alors de faciliter la migration, plutôt que d'essayer de l'empêcher.

1000 Words / Shutterstock

Évacuer les victimes des inondations sera un enjeu essentiel pour les responsables locaux (Bangkok, en Thaïlande, 4 novembre 2011).

En conclusion, on peut affirmer que l'environnement, aujourd'hui, représente un facteur croissant de migrations, et surtout de migrations forcées. Mais *in fine*, ce sont bien les politiques qui seront mises en œuvre, et en particulier les politiques d'adaptation, qui détermineront l'ampleur et la nature des mouvements migratoires à venir.

Bibliographie

F. Gemenne, *Why the numbers don't add up: a review of predictions and forecasts for environmentally-induced migration*, Global Env. Change, vol. 21 (S1), pp. 41-49, 2011.

F. Gemenne, *Géopolitique du Changement Climatique*, Armand Colin, 2009.

Les enjeux économiques

Pierre-Alain Jayet est directeur de recherche INRA, UMR Économie publique, INRA-AgroParisTech, Grignon.

Stéphane De Cara est directeur de recherche INRA, UMR Économie publique, INRA-AgroParisTech, Grignon.

Nathalie de Noblet-Ducoudré est directeur de recherche CEA, Unité mixte CEA-CNRS-UVSQ, Gif-sur-Yvette.

Modifier l'usage des sols pour concilier production agricole et maîtrise des émissions de gaz à effet de serre : les économistes cherchent à intégrer ces différents objectifs dans une approche globale.

Avec près de 6 gigatonnes d'équivalent dioxyde de carbone libérées chaque année dans le monde (sur un peu moins de 50 gigatonnes de dioxyde de carbone émises globalement en 2010), les sources agricoles de gaz à effet de serre pèsent plus que les transports. À ces émissions agricoles, il convient d'ajouter celles dues aux changements d'usage des sols, en particulier la déforestation. Ensemble, les secteurs liés à la terre (notamment l'agriculture et la forêt) comptent parmi les plus importants contributeurs à l'effet de serre au plan mondial. Par conséquent, l'agriculture et la forêt ont un rôle essentiel à jouer tant vis-à-vis de l'atténuation des émissions que de l'adaptation au changement climatique.

La nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en s'adaptant au changement climatique et en répondant aux besoins alimentaires et non alimentaires d'une population mondiale croissante soulève diverses questions : comment optimiser la production agricole et, plus largement, les usages des sols dans ce contexte ? Comment inciter producteurs et consommateurs à modifier efficacement leurs modes de production et leurs comportements alimentaires ? Pour quel résultat environnemental ? Ces questions ne sont pas seulement d'ordre agronomique, écologique ou climatique. Elles impliquent également de prendre correctement en compte les conséquences du changement climatique sur les systèmes économiques, du niveau microéconomique (l'exploitation agricole par exemple) au niveau macroéconomique (implications pour les usages des sols au sens large, répartition de l'effort d'atténuation entre les secteurs, conséquences sur les marchés mondiaux). Ces différentes échelles d'analyse font appel à plusieurs types de modèles économiques, lesquels fournissent une approche quantitative des marges de manœuvre des politiques publiques en matière d'atténuation et d'adaptation.

Comment atteindre un objectif d'atténuation donné au coût le plus faible pour la société ? Cette question de l'efficacité en coût est à la base de l'économie de l'environnement. L'efficacité en coût implique de mobiliser en priorité les potentiels d'atténuation là où ils sont les moins coûteux. Parce que les conditions de production, et donc les coûts de

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

réduction des émissions sont hétérogènes, il n'y a aucune raison pour que la répartition de l'effort d'atténuation soit uniforme d'un individu, d'une région ou d'un secteur à l'autre. La difficulté est alors de s'assurer que les décisions prises par l'ensemble des agents permettent d'atteindre un objectif au coût total le plus faible. L'économie de l'environnement a montré que les instruments économiques sont efficaces pour orienter les décisions microéconomiques dans ce sens. Le principe est simple : en transmettant un signal (sous la forme d'une taxe ou du prix d'un marché de quota d'émissions) reflétant la valeur de l'effet causé par les émissions, on incite chaque agent à intégrer cette valeur dans ses choix de production ou de consommation, ce qui améliore l'efficacité globale.

Évaluer les coûts et les potentiels d'atténuation

Pour analyser la répartition efficace de l'effort d'atténuation au sein du secteur agricole, il est nécessaire de mesurer les coûts et les potentiels d'atténuation, ainsi que leur distribution dans l'espace et selon les types d'exploitations. De telles évaluations peuvent être fournies par des modèles microéconomiques de l'offre agricole. Ces derniers décrivent le comportement économique d'un grand nombre d'exploitations représentatives de la diversité des conditions de production agricole en fonction des prix, des dispositifs d'aides et des contraintes agronomiques et zootechniques qui s'appliquent aux différentes productions dans divers contextes. Ils permettent de simuler les conséquences de l'introduction de telle ou telle politique publique sur les choix de production, les émissions et les revenus des exploitants.

Ce type de modèle a été appliqué au secteur agricole français qui, malgré une contribution importante aux émissions (environ 20 pour cent des émissions françaises), est largement absent des dispositifs français de lutte contre l'effet de serre. En 2011, nous avons montré que, même avec des hypothèses relativement conservatrices quant au potentiel d'atténuation, l'agriculture française serait à même de réduire ses émissions de 10 pour cent par rapport à 2005 à un coût de l'ordre de 35 euros par tonne d'équivalent dioxyde de carbone. Ce coût, comparable à celui qui prévaut dans les autres secteurs de l'économie, indique que l'agriculture a un rôle important à jouer pour que la France atteigne ses objectifs d'atténuation au moindre coût.

Le même modèle a été appliqué au niveau européen pour évaluer les gains en efficacité permis par la mise en place d'un marché des droits à émettre des gaz à effet de serre au sein de l'agriculture dans le cadre des objectifs du paquet énergie-climat. Ce dernier, adopté par l'Union européenne en 2009, vise à augmenter la part des énergies renouvelables, réduire les émissions de dioxyde de carbone et accroître l'efficacité énergétique. Il contient des objectifs ambitieux de réduction des émissions à l'horizon 2020 pour les secteurs non couverts par le marché européen du carbone (agriculture, secteur résidentiel, transports). Ces objectifs ont fait l'objet d'un accord de « partage de l'effort » entre les pays européens.

Nos résultats montrent que le coût de l'atténuation pour le même objectif environnemental (10 pour cent de réduction au niveau européen en 2020 par rapport aux niveaux de 2005) pourrait être divisé par deux par rapport à ce qu'impliquerait le respect par chaque pays de ses objectifs fixés par

Quel rôle pour le consommateur ?

En France, l'alimentation, qui représente environ 30 pour cent des impacts « gaz à effet de serre », a aussi des effets – positifs ou négatifs – sur la ressource en eau, la biodiversité, l'emprise territoriale. La phase de production agricole représente la proportion la plus importante de la plupart de ces impacts, selon une approche « cycle de vie » de la chaîne alimentaire prenant en compte la production agricole, le stockage et la transformation des denrées alimentaires, leur transport, leur distribution, leur consommation et la gestion des déchets.

Les inventaires de cycle de vie des produits agricoles mettent en évidence des impacts très différents par kilogramme de produit, selon le type de denrée (produits végétaux ou animaux, type de viande), mais aussi selon le mode de production (plein champ ou sous serre chauffée, élevage extensif ou classique). Toutefois, chaque aliment, qui répond à des besoins nutritionnels différents et à des attentes économiques et sociales variées, peut avoir sa place dans une alimentation équilibrée.

Quel rôle peut jouer le consommateur ? Tout d'abord, il peut prendre conscience du lien entre son alimentation et l'environnement. Une première action simple et économique consiste à limiter le gaspillage alimentaire, qui représente environ 30 kilogrammes par personne et par an d'aliments jetés : autant d'aliments qu'il a fallu produire, transformer, stocker. Par ailleurs, il peut faire évoluer son régime alimentaire : la surconsommation alimentaire, l'alimentation de type occidental très riche en produits animaux, sucres et graisses, la consommation d'alcool ou de boissons sucrées, augmentent l'empreinte environnementale de la consommation alimentaire, mais constituent également des facteurs de risque pour la santé. Enfin, le consommateur peut favoriser certains modes et lieux de production, en sélectionnant des produits portant des labels reconnus, et en évitant les fruits et légumes hors saison.

Yuri photo / Shutterstock

Sarah Martin et Vincent Colomb, ADEME

le partage de l'effort. Cette réduction des émissions agricoles serait obtenue à un prix compris, à l'équilibre, entre 30 et 40 euros par tonne d'équivalent dioxyde de carbone.

En outre, l'efficacité ne doit pas être évaluée à l'aune des conséquences sur le seul secteur agricole. L'atténuation obtenue dans le secteur agricole pourrait se substituer en partie aux actions les plus coûteuses dans les autres secteurs de l'économie, permettant de réduire les coûts totaux d'atténuation. Ainsi, l'extension du marché du carbone européen aux émissions agricoles permettrait de réduire de 30 pour cent le coût d'atténuation consenti par les autres secteurs de l'économie (soit une économie annuelle de plus de deux milliards d'euros) pour le même objectif global de réduction des émissions à l'horizon 2020.

La participation de l'agriculture à l'atténuation peut également passer par la fourniture de biomasse, source d'énergie. À la faveur de prix élevés de l'énergie, les biocarburants sont apparus au cours des années 2000 comme un moyen de diversifier l'offre énergétique tout en assurant des débouchés aux agriculteurs et en réduisant les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports. Toutefois, les effets indirects du développement des biocarburants sur les changements d'usage des sols ont remis en cause le bilan net en termes d'émissions *(voir l'encadré ci-contre)*. Au-delà de cette controverse, il apparaît que les liens complexes entre atténuation de gaz à effet de serre et usages des sols peuvent avoir des effets opposés en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Cela nécessite de prendre en compte simultanément l'ensemble des usages des sols (notamment l'agriculture et la forêt) dans les modèles économiques.

Les résultats confirment l'importance des instruments économiques pour inciter les exploitants à modifier leurs modes de production et, ce faisant, à réduire leurs émissions au meilleur coût pour l'ensemble de la société. Sans de telles incitations, le coût total de l'effort peut apparaître trop important, favoriser l'inaction, alors même que des potentiels d'atténuation existent.

L'agriculture et la forêt sont influencées par le climat. Les projections faites à différents horizons sont conditionnées par les techniques que l'on connaît aujourd'hui, mais que l'on fait évoluer pour en améliorer l'efficacité. Ainsi, au prix d'un effort de recherche soutenu, la consommation d'énergie par unité de service rendu décroîtra.

En agriculture, par exemple, on anticipe une plus grande efficacité dans l'utilisation des intrants (énergie, engrais, produits phytosanitaires, semences, irrigation), dans le cadre d'une agriculture raisonnée. Dans les modèles conçus pour être plus favorables à l'environnement, on travaille sur les systèmes où les intrants sont limités. En revanche, les modélisations sont plus compliquées quand il s'agit de prévoir l'apport des progrès de la génétique, du développement des OGM, de la mise au point de nouvelles variétés. Ce champ de l'adaptation relève pour une part des politiques de recherche et de développement. Or,

Les biocarburants en question

La contribution des biocarburants de première génération à l'atténuation des changements climatiques suscite, depuis plus de cinq ans, de vifs débats dans la communauté scientifique et dans les milieux politiques. Ce potentiel a été évalué par des analyses dites en cycle de vie qui comptabilisent les émissions de gaz à effet de serre de la phase de production jusqu'à la phase de consommation. Toutefois, il a été estimé de façon incomplète, car il ne considère pas les effets indirects du développement de ces filières. En effet, comme la demande de matières premières agricoles utilisées pour produire des biocarburants augmente, cela entraîne une tension sur les marchés, une hausse des prix, une incitation à produire, et donc potentiellement la conversion en terres agricoles de parcelles initialement non destinées à de tels usages. Ce changement d'usage libère le carbone stocké dans les sols et dans la biomasse qui s'y était développée.

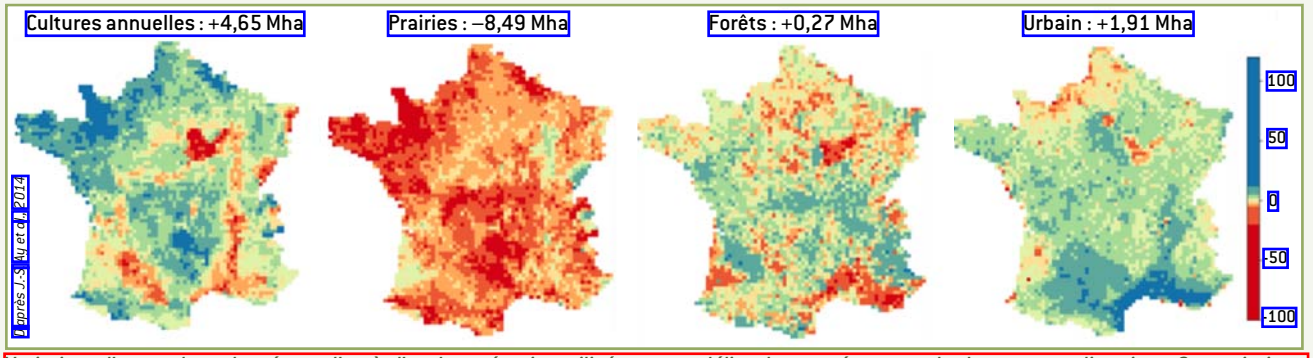
Le calcul de ces quantités de carbone libéré, combiné au bilan des biocarburants, est complexe et confronté à des incertitudes. Il fait appel à divers modèles, notamment économiques. Les différentes estimations de ces émissions réalisées à travers le monde sont variables, et le bilan en termes de gaz à effet de serre libéré par ces filières peut être notablement dégradé, comme le confirme l'évaluation réalisée en 2012 par l'INRA à la demande de l'ADEME. D'après la moitié des évaluations publiées, en tenant compte des émissions liées aux changements d'usage des sols, on constate que les émissions liées à l'usage des biocarburants de première génération seraient supérieures à celles des carburants fossiles. Les recherches sont à poursuivre pour préciser ces bilans et identifier des voies d'amélioration. Au-delà des biocarburants, il conviendra d'intégrer les émissions de gaz à effet de serre liées aux effets indirects des différentes politiques d'usage des sols, par exemple les autres cultures énergétiques, le développement de l'élevage ou encore l'urbanisation des terres agricoles.

Antonio Bispo, ADEME

Sasujwitch-Stock / Shutterstock

La canne à sucre peut être utilisée pour produire des biocarburants.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014



Variations d'usage des sols prévues d'après l'un des scénarios utilisés pour modéliser les conséquences du changement climatique. Ces variations représentent l'évolution prévue entre 2003 et 2053 des surfaces dédiées à quatre usages (de gauche à droite : les cultures annuelles, les prairies, les forêts et les zones urbanisées). Sur ces cartes, les surfaces sont exprimées en dizaines d'hectares par maille de 12 kilomètres sur 12.

sous l'effet du changement climatique, les exploitants agricoles (tout comme les autres agents économiques), adapteront leur pratique agronomique aux nouvelles conditions, comme ils s'adapteraient à tout changement de politique publique. Ce changement se fera de façon autonome, et sera difficile à intégrer dans les modèles économiques globaux.

L'économie de l'adaptation

En 2013, David Leclère et ses collègues, de l'INRA et du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, ont mis en évidence les effets d'une adaptation autonome des exploitations agricoles à l'échelle de l'Union européenne dans deux scénarios climatiques. Les productions des terres agricoles et leur localisation changeraient, ainsi que les émissions agricoles de gaz à effet de serre, avec une évolution marquée des besoins en eau. Il n'est pas exclu qu'aux conditions actuelles de prix, les agriculteurs européens bénéficient de ces évolutions. C'est même le scénario associé à la hausse la plus marquée des températures qui semble le plus favorable. Au Sud comme au Nord, la disponibilité de la ressource en eau pourrait devenir l'enjeu principal. Inévitablement, se posera le problème de l'accès à la ressource en eau au bon endroit et au bon moment. Par ailleurs, avec l'augmentation de la demande alimentaire, les prix agricoles pourraient augmenter, comme on l'observe déjà depuis quelques années. Favorable dans un premier temps aux producteurs, cette évolution sera freinée par une augmentation des prix des intrants.

Les impacts du changement climatiques sur les conditions de production sont susceptibles de modifier les revenus issus des différents usages des sols, qu'ils soient agricoles, forestiers, mais aussi urbains. Au-delà des impacts sur les systèmes agricoles et forestiers, les modifications du climat auront des conséquences sur les marchés fonciers et sur l'usage des sols. C'est ce qu'ont étudié Jean-Sauveur Ay et ses collègues de l'INRA. À partir de données historiques sur les usages des sols français, ils ont évalué les liens entre les revenus espérés de cinq usages (cultures annuelles, prairies, forêt, cultures pérennes et usage urbain) et les conditions climatiques. Leurs résultats indiquent que le changement climatique à l'horizon 2050 modifierait notablement les usages en France *(voir la figure ci-dessus)*. Ils font apparaître une diminution des prairies (perdant environ 8,5 millions d'hectares) au profit de cultures annuelles (gagnant près de 5 millions d'hectares). Les prairies stockant d'importantes quantités de carbone, de telles évolutions auraient des conséquences notables sur les émissions dues aux usages des sols.

Ainsi, en s'adaptant, les systèmes vont modifier de façon sans doute notable, à la baisse ou à la hausse, les émissions de gaz à effet de serre. On estime que, chez beaucoup d'exploitants agricoles européens, la hausse des rendements pourrait se traduire par une hausse des émissions d'oxyde d'azote, N_2O, liées à l'augmentation de l'utilisation d'amendements azotés. Cela influera sur les stratégies d'atténuation, qui sont elles-mêmes susceptibles d'engendrer une dynamique d'adaptation.

Cette dynamique dépend en grande partie de celle des émissions et de leur effet retardé sur le climat. Les gaz à effet de serre, avec des temps de présence dans l'atmosphère et des influences différents, contribuent à rendre cette dynamique complexe à analyser. Du point de vue économique, il faut aussi comparer les efforts et les bénéfices réalisés aujourd'hui à ceux qu'il faudrait consentir demain si l'on attend.

Mais la complexité ne doit pas servir de prétexte à l'inaction. Si l'on connaît les difficultés à mettre en œuvre la régulation d'une pollution, même quand elle est aussi simple à caractériser que celle des eaux naturelles par les nitrates, et quelle que soit la confiance que l'on puisse avoir dans le progrès technique, un principe élémentaire de précaution devrait nous obliger à agir rapidement pour limiter les conséquences localement incertaines, et globalement importantes, du changement climatique.

Bibliographie

J.-S. Ay *et al.*, *Integrated models and scenarios of climate, land use and common birds dynamics*, *Proceedings of the Global Land Project*, 2nd Open Science Meeting, Berlin, 2014.
D. Leclère *et al.*, *Farm-level autonomous adaptation of European agricultural supply to climate change*, *Ecological Economics*, vol. 87, pp. 1-14, 2013.
S. De Cara & P.-A. Jayet, *Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions from European agriculture, cost-effectiveness, and the EU non-ETS Burden Sharing Agreement*, *Ecological Economics*, vol. 70(9), pp. 1680-1690, 2011.
WRI (2014) : http://cait2.wri.org/profile/World
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Fr RMS 2013 .pdf

Des menaces aux solutions

Jean-François Soussana est directeur scientifique Environnement - INRA.

Thierry Caquet dirige le Métaprogramme Adaptation au changement climatique - INRA.

Jérôme Mousset est chef du Service Agriculture et forêts - ADEME.

Face au changement climatique, les recherches visent à conjuguer une baisse des émissions de gaz à effet de serre et des adaptations qui seront, quoi qu'il advienne, nécessaires dans un futur proche.

Le second volume du cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur le climat, le GIEC, sera publié le 30 mars 2014. Il sera consacré aux impacts du changement climatique, aux adaptations possibles et à la vulnérabilité des systèmes et des populations humaines exposées. En attendant cette publication, revenons, au terme de ce dossier, sur les principales conclusions pour l'agriculture, la forêt, les écosystèmes et les populations rurales qui en dépendent.

Le premier volume, publié en 2013, a confirmé que le changement climatique est déjà en cours et que ses effets commencent à se manifester dans de nombreux systèmes naturels : réchauffement des surfaces terrestres et de la basse atmosphère ; réchauffement jusqu'à 2 000 mètres de profondeur dans l'océan ; augmentation des températures maximales et réduction des températures minimales ; précipitations plus intenses ; montée du niveau de la mer ; acidification des océans ; réduction du manteau neigeux et des calottes glaciaires. Le réchauffement planétaire devrait s'accélérer au cours des prochaines décennies pour atteindre, dans les années 2030, entre 1 et 2,5 °C par rapport aux années 1900. Ce réchauffement est pratiquement inévitable, en raison de l'inertie du système climatique.

Maîtriser les options climatiques

À partir de 2050, s'ouvre la période des options climatiques au cours de laquelle la température mondiale dépendra d'émissions de gaz à effet de serre qui n'ont pas encore eu lieu. S'il est encore temps de limiter à 2 °C le réchauffement moyen à cette période, seule une réduction drastique des émissions mondiales de gaz à effet de serre permettra d'y parvenir. Le secteur de l'agriculture peut contribuer à cet effort. En adoptant dans chaque région les meilleures pratiques disponibles, une baisse de l'ordre de 20 pour cent des émissions de méthane et de protoxyde d'azote serait possible sans réduction de la production. Le potentiel d'atténuation de l'agriculture mondiale d'ici 2030 est estimé à près de six milliards de tonnes d'équivalent dioxyde de carbone par an et près de la moitié de ce potentiel serait accessible moyennant un financement de 50 dollars par tonne de dioxyde de carbone évitée.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

Le stockage de carbone dans la matière organique des sols cultivés et des prairies, ainsi que la restauration des sols dégradés présentent probablement le potentiel le plus important pour la lutte contre l'effet de serre en agriculture. Viennent ensuite la réduction des émissions de méthane de l'élevage et des rizières, et la maîtrise du cycle de l'azote. En outre, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites en remplaçant les combustibles fossiles par des sous-produits agricoles, par exemple, du biogaz issu de la fermentation anaérobie de résidus de récolte et d'effluents d'élevage.

L'expansion des biocarburants aux dépens des cultures alimentaires participe à la déforestation et, de manière indirecte, aux émissions de dioxyde de carbone de l'agriculture. En limitant sous les tropiques l'extension des cultures et des prairies semées, il serait possible de ralentir les émissions de dioxyde de carbone causées par la déforestation tropicale, et la mise en culture des savanes et des prairies natives. De plus, les activités de boisement permettent de piéger le carbone, de réduire l'érosion des sols, et de créer des habitats favorables à la biodiversité.

S'adapter à la variabilité climatique

D'ici 2030, la concentration atmosphérique élevée du dioxyde de carbone et le réchauffement pourraient avoir des conséquences positives sur la croissance de la végétation (forêts, cultures) aux latitudes élevées notamment. Dans l'hypothèse d'un réchauffement progressif, sans augmentation de la variabilité du climat, ces effets positifs seraient dominants à l'échelle de l'Europe.

Toutefois, la variabilité du climat risque de se renforcer, avec selon les régions et les saisons une augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules et des sécheresses ou, au contraire, des précipitations intenses et des inondations. Face à ces risques climatiques, les systèmes de production doivent devenir plus résilients, c'est-à-dire capables de bonnes performances malgré les perturbations. Les agriculteurs s'adaptent déjà au réchauffement climatique en faisant évoluer leurs pratiques agricoles. Ces adaptations aux aléas seront progressivement facilitées par la veille agroclimatique, qui consiste à pronostiquer en cours de saison l'impact du climat sur la production, et par des prévisions climatiques améliorées aux échelles du mois ou de la saison. Améliorer la gestion du risque climatique en agriculture nécessite aussi la diversification des cultures et des systèmes d'élevage. Enfin, il sera nécessaire de concevoir des systèmes d'irrigation plus économes en eau, de passer dans certains cas du maïs irrigué au sorgho (plus économe en eau) et de développer de petits aménagements hydrauliques tout en minimisant leur impact sur les milieux aquatiques.

Une autre piste concerne la génétique végétale et animale. S'il est possible d'améliorer la tolérance à des températures élevées des variétés

Andrey Kuzmin / Shutterstock

Inventer les scénarios du futur

Face au changement climatique, la construction de scénarios prospectifs permet d'analyser différentes alternatives et de proposer des orientations. L'ADEME et d'autres organismes réalisent ce type de projections dont on peut dégager plusieurs enseignements généraux pour l'agriculture et la forêt. En conservant la capacité de l'agriculture à nourrir une population française croissante et à exporter, il ressort que le potentiel maximal de réduction des gaz à effet de serre pour l'agriculture se situera entre 30 et 50 pour cent en 2050 selon l'ampleur des modifications envisagées, alors qu'il pourra atteindre 90 pour cent pour d'autres secteurs. Les principales hypothèses des scénarios agricoles portent sur la gestion de l'azote, la simplification du travail du sol, la méthanisation, l'agroforesterie, l'alimentation animale, l'évolution vers une consommation alimentaire plus proche des recommandations nutritionnelles.

Les scénarios mettent en lumière l'enjeu de la gestion des stocks de carbone, car toute variation de stock, même faible, a un impact considérable sur les bilans de gaz à effet de serre. Aussi, la préservation du capital carbone dans les sols (maintien des prairies et des teneurs en matière organique) constitue un élément important dans les hypothèses retenues. Cela passe également par un arrêt d'ici 2030 de l'artificialisation des sols (étalement urbain, voirie, etc.), pour préserver l'espace agricole et forestier.

Par ailleurs, la plupart les projections montrent un rôle croissant et stratégique de la biomasse dans l'énergie. Dans le scénario ADEME, la biomasse pourrait fournir en 2050 30 pour cent de l'énergie consommée en France. Pour atteindre cet objectif, il faudrait d'abord réduire la consommation d'énergie de 50 pour cent, mieux valoriser la forêt et favoriser le développement de la méthanisation agricole. Enfin, les simulations mettent en exergue la question essentielle de la gestion de l'eau, avec un recours accru à l'irrigation, alors même que la ressource devrait être de plus en plus limitée.

végétales et des races animales – et de produire des plantes résistantes à la sécheresse ou à un excès d'eau –, il sera beaucoup plus difficile de le faire sans réduire le potentiel de production durant les années favorables. Un effort considérable de recherche doit donc être engagé, notamment pour sélectionner les meilleurs phénotypes dans des environnements modifiés pour correspondre aux conditions climatiques du futur. Plusieurs cycles de sélection seront nécessaires, chacun nécessitant une dizaine d'années environ, ce qui souligne l'urgence des efforts à entreprendre.

La question de la santé végétale, animale et humaine se posera également puisque les risques liés à des maladies vectorielles tendront à augmenter. Comme l'usage des pesticides et des antibiotiques en agriculture doit être réduit, la maîtrise de la santé animale et végétale deviendra plus exigeante. Les stratégies de surveillance épidémiologique et de gestion des risques sanitaires devront être renforcées en conséquence.

Les pistes d'adaptation seront plus restreintes pour les forêts, qui sont particulièrement sensibles aux aléas climatiques (sécheresses, tempêtes et incendies). Cette vulnérabilité menace non seulement la production de bois, de fibres et de bioénergie, mais elle risque également d'affaiblir le puits de carbone que représente la forêt au niveau mondial. Il sera nécessaire d'accroître la biodiversité des forêts, de guider l'évolution génétique au sein des espèces forestières, de favoriser le renouvellement des arbres par des rotations accélérées et de limiter l'ampleur des incendies par des aménagements.

Certains territoires seront particulièrement touchés : en zone littorale, en raison de la salinisation et de l'inondation d'une partie des sols et de l'érosion accélérée des côtes ; en zone de montagne, du fait d'un dépérissement accru des forêts ; dans les plaines inondables, où les dommages aux parcelles, aux bâtiments et aux infrastructures se multiplieront. Mais des opportunités pourraient se développer pour l'agriculture aux latitudes élevées. Ainsi, les pays nordiques pourraient cultiver du maïs, même si les rendements seront vraisemblablement irréguliers du fait des risques de gelées. La vigne devrait pouvoir s'étendre au Royaume-Uni, au Danemark et remonter en Europe centrale. Toutefois, le potentiel des sols et la disponibilité en eau limiteront dans certains cas la remontée en latitude des zones de cultures.

Et si la température augmentait de 4 °C ?

Dans l'hypothèse d'un réchauffement global atteignant 4 °C à la fin du XXIe siècle, les extrêmes climatiques se renforceraient notablement. En Europe, les canicules et les sécheresses estivales toucheraient surtout la moitié Sud du continent, tandis que les épisodes de précipitations intenses se généraliseraient principalement à l'automne et en hiver *(voir la figure page ci-contre)*. Les risques du changement climatique dans un tel scénario seront amplifiés par les rétroactions entre les ressources en eau et en sols, la végétation et le climat à l'échelle régionale. Des sécheresses et des canicules fréquentes réduisent la productivité des écosystèmes et des cultures, ce qui limite l'apport de matière organique au sol et le taux de couverture par la végétation. Il en résulte une dégradation des sols, qui réduit leur capacité à retenir l'eau, renforçant ainsi les risques de sécheresses.

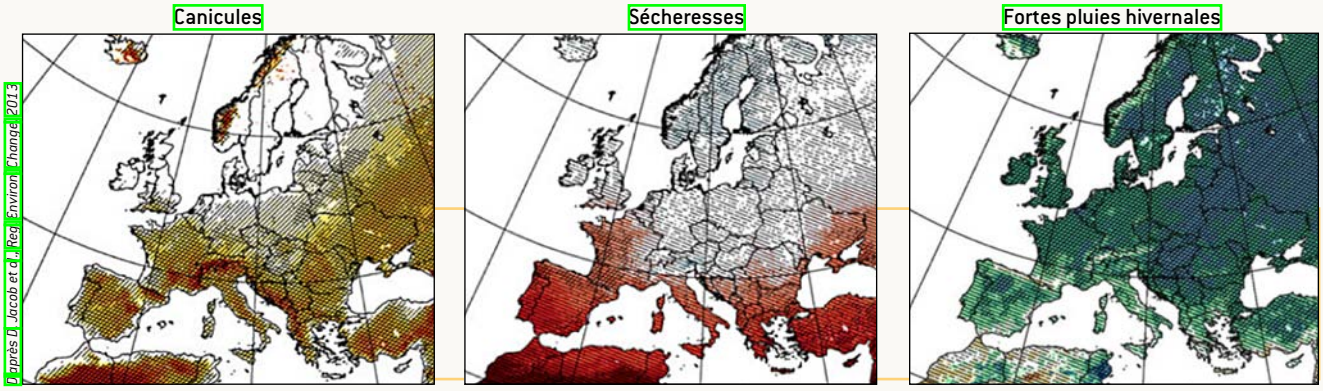
De plus, la sécheresse et la canicule entraînent d'importantes pertes de carbone des écosystèmes : on estime à quelque 0,5 milliard de tonnes la perte de carbone durant l'été 2003 en Europe. Une récurrence accrue de ces extrêmes pourrait transformer en savane des forêts aussi importantes que l'Amazonie. Le pourtour méditerranéen, qui sera particulièrement touché par les canicules et les sécheresses, serait également menacé par une dégradation marquée des sols et de la végétation.

Recherches pour l'adaptation au changement climatique

Sur la décennie 2010-2020, l'INRA développe un programme prioritaire sur l'adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt. Ce programme a trois objectifs : gérer les risques et les opportunités à moyen terme associés à la variabilité et aux extrêmes du climat ; prévoir et modéliser les impacts régionaux du changement climatique ; développer des options d'adaptation pour le long terme. Ces options concernent aussi bien la biodiversité sauvage et cultivée (ressources génétiques), la santé des écosystèmes, des plantes et des animaux d'élevage, la génétique végétale et animale, la capacité d'adaptation des systèmes de production, des territoires et des filières. Les technologies développées devront être compatibles avec la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la conservation des stocks de carbone des sols et des forêts. Les coûts et les bénéfices des mesures d'adaptation seront analysés en termes de compétitivité économique, de biodiversité, de ressources en eau et en sols, de satisfaction des besoins alimentaires, et de qualité et sécurité sanitaire des produits. Le programme aborde aussi les besoins de formation, les modes d'organisation collective et les politiques publiques.

Yu Lan/Shutterstock

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014



Événements climatiques extrêmes en Europe à la fin du siècle (années 2071-2100 comparées aux années 1971-2000) pour un scénario de fortes émissions de gaz à effet de serre (les zones de forte augmentation sont en rouge pour les canicules et les sécheresses, en bleu pour les pluies).

Dans un scénario à +4 °C, on verrait apparaître des risques systémiques du changement climatique à la fin du XXIe siècle : réduction des ressources en eau souterraines et superficielles exacerbant les concurrences entre l'agriculture et les autres secteurs, forte réduction du potentiel de production des forêts européennes et de la valeur du foncier, baisse des rendements agricoles et réduction de l'ensemble des services des écosystèmes en Europe du Sud. Les conséquences économiques d'un réchauffement de cette ampleur ont été estimées à une perte annuelle moyenne du produit intérieur brut de un pour cent par an pour l'ensemble de l'Europe, alors que la croissance moyenne historique du produit intérieur brut européen a été de deux pour cent par an.

À l'échelle mondiale, la hausse de la demande alimentaire liée à la croissance démographique et à l'accroissement des richesses pourrait dépasser dans ce scénario l'offre alimentaire étant donné les impacts négatifs du changement climatique. Il en résulterait une baisse de la sécurité alimentaire mondiale et une augmentation de la mortalité infantile.

Vers la transition écologique

Pour éviter ce scénario du pire, il faut trouver des solutions rendant compatibles la production agricole, la réduction des gaz à effet de serre et l'adaptation au changement climatique. L'agriculture intelligente face au climat a été définie comme une agriculture qui augmente durablement la productivité et la résilience (adaptation), réduit les émissions de gaz à effet de serre (atténuation) et améliore la sécurité alimentaire et le développement. Des systèmes plus résilients peuvent avoir des effets secondaires bénéfiques comme la séquestration du carbone et des réductions de gaz à effet de serre par unité de produit. Une intensification agricole durable permettrait de combler les déficits de rendement et d'augmenter l'efficacité d'utilisation des ressources naturelles par l'agriculture, en particulier dans les pays en développement. Cette stratégie pourrait améliorer la sécurité alimentaire et contribuer à atténuer les changements climatiques en mettant un terme à la déforestation et à l'expansion de l'agriculture sur des écosystèmes sensibles.

Les changements alimentaires et les politiques bioénergétiques peuvent également contribuer. Par exemple, passer d'une consommation de viande d'animaux (bovins, ovins) nourris au grain à celle d'animaux nourris à l'herbe et ne pas utiliser les cultures alimentaires comme source de biocarburants pourrait améliorer la disponibilité mondiale de calories et réduire les impacts environnementaux de l'agriculture. Il s'agit aussi de réduire les pertes après récolte, par l'amélioration du stockage et du transport des aliments dans les pays en développement. Dans les pays industrialisés, ce sont principalement les gaspillages d'aliments dans la distribution et la consommation qu'il faudra limiter.

À l'échelle d'un pays comme la France, des scénarios illustrent le potentiel d'une transition écologique qui permettrait de réduire d'ici 2050 de 30 à 50 pour cent les émissions de gaz à effet de serre en agriculture *(voir l'encadré page 83)*. L'augmentation de la résilience des systèmes agricoles n'a pas encore été suffisamment explorée dans ces scénarios, même si plusieurs options ont été proposées.

Les efforts de recherche en cours devraient contribuer à combler cette lacune et à dégager les bases d'une transition écologique de l'agriculture, de la forêt et de la gestion de la biodiversité *(voir l'encadré page ci-contre)*. À brève échéance, ces recherches pourraient aussi contribuer à évaluer les potentiels des politiques à mener dans la perspective d'un nouvel accord de l'ensemble des pays, en développement, émergents et industrialisés. Cet accord sera discuté lors de la négociation internationale qui aura lieu à Paris fin 2015 dans le cadre de la XXIe conférence des parties à la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique.

Bibliographie

J.-F. Soussana (sous la direction de), *S'adapter au changement climatique, Agriculture, écosystèmes et territoires*, Quae, 2013.
S. Pellerin *et al.*, *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?*, INRA, 2013.
D. Jacob D. *et al.*, *EURO-CORDEX : New high-resolution climate change projections for European impact*, *Regional Environmental Change*, 2013.
J. Ciscar *et al.*, *Physical and economic consequences of climate change in Europe*, *PNAS*, 2010.

LOGIQUE & CALCUL

Les preuves de travail

Donner à des ordinateurs des problèmes à résoudre permet de les freiner. Cette procédure est utile pour lutter contre les attaques sur le réseau Internet, pour limiter l'envoi de spams ou pour organiser des courses entre machines.

Jean-Paul DELAHAYE

Aujourd'hui, les ordinateurs qui sont à notre disposition sont très puissants et nous nous en réjouissons, car cela les rend plus utiles : ils manipulent de longs textes, des photos ou même de la vidéo, ils explorent rapidement des pages Internet à l'autre bout du monde, ils exécutent des programmes de jeux aux effets graphiques époustouflants, etc.

Cependant, cette puissance est parfois mal utilisée et crée des dysfonctionnements. Ainsi, n'importe qui peut envoyer des dizaines de milliers de messages électroniques qui encombrent les boîtes aux lettres au point de les rendre inutilisables : c'est le problème des courriels non sollicités, ou spams. Par ailleurs, quelques ordinateurs coordonnés sont en mesure de soumettre, plusieurs milliers de fois par seconde, des requêtes à un même service en ligne et ainsi d'en empêcher le fonctionnement : ce sont les attaques par « déni de service » ou DoS (pour *Denial of Service*).

Une idée étonnante a été proposée pour contrôler les effets de cet excès de puissance de nos machines. Il s'agit de soumettre aux ordinateurs des problèmes à résoudre, afin qu'ils calculent longuement pour trouver la solution ; alors seulement, ces ordinateurs ont le droit d'accéder à une boîte à lettres ou à un service informatique en ligne.

Ces « preuves de travail » jouent un rôle de plus en plus important. Elles sont combinées aux outils de base de la cryptographie moderne (chiffrage, signature numérique, authentification, etc.) pour concevoir des protocoles complexes réalisant des opérations considérées comme impossibles il y a peu. Les monnaies numériques décentralisées, dont le célèbre et controversé *Bitcoin*, fonctionnent toutes selon un protocole où les « preuves de travail » jouent un rôle essentiel. Nous y reviendrons.

Ces preuves de travail sont toujours des problèmes dont la solution est difficile à trouver, mais facile à vérifier. L'ordinateur qui doit résoudre le problème soumis ne peut le faire rapidement, mais quand il propose une solution pour accéder au service qui l'exige, la vérification de la solution est immédiate. Il existe de nombreuses méthodes pour fabriquer les problèmes des preuves de travail. On préfère bien sûr celles dont il est facile d'ajuster la difficulté à la situation, pour que le temps de résolution ne soit ni trop court ni trop long.

Des preuves avec ou sans échanges de messages

Deux types de preuves de travail sont utilisés : les systèmes fonctionnant par échanges multiples de messages et les systèmes à un seul envoi.

Dans le cas des « preuves de travail par échanges multiples », voici les étapes du protocole. La machine D (pour *Demandeur*) qui souhaite accéder au service S le contacte ; le service S élabore un problème et l'envoie à D ; la difficulté du problème est ajustée en prenant par exemple en compte la surcharge du service S à l'instant de la demande, ou ce que S sait déjà de D ; la machine D résout le problème, ce qui exige d'elle un certain travail, donc du temps ; quand D a résolu le problème, il envoie la solution au service S ; le service S vérifie que la solution soumise est bonne, ce qui est facile pour lui, et, si c'est le cas, donne accès au service, c'est-à-dire accepte de placer un message dans la boîte à lettres, ou ouvre la page d'accueil du service en ligne que demande D.

Dans le cas du protocole des « preuves de travail sans échange », tout se passe au cours d'un seul envoi. Selon des paramètres que le demandeur D connaît sans avoir à contacter le service S, un problème à résoudre est défini. La façon de le définir est fixée une fois pour toutes et connue d'avance. Le contenu du message que D veut envoyer détermine par exemple le problème (et donc le problème à résoudre change à chaque demande, ce qui est évidemment essentiel). Le demandeur D connaît donc, sans contacter le service S, le travail qu'il doit réaliser. Quand D a résolu le problème, ce qui lui prend un peu de temps, il envoie la solution trouvée au service S qui ne donne suite à sa demande que si la solution proposée est correcte.

La seconde méthode est souvent préférable : elle est plus simple pour le service qui n'a pas à s'occuper de définir un pro-

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

blème particulier à chaque demande. Mais la première méthode permet une prise en compte plus fine de la surcharge du service à l'instant de la demande ou d'informations connues de S concernant D.

Le délai nécessaire pour que le demandeur résolve le problème posé est le plus souvent fondé sur un calcul à faire par le demandeur. Le temps qu'il met à résoudre le problème dépend donc de sa puissance de calcul et les machines puissantes sont avantagées. Aussi a-t-on envisagé des preuves de travail exigeant beaucoup de mémoires (plutôt que beaucoup de calculs) ou nécessitant la recherche d'informations sur le réseau. Dans ce dernier cas, les machines puissantes ne sont pas avantagées, puisque ce qui nécessite du temps est lié à la vitesse de circulation des informations sur le réseau, qui est la même pour tout le monde.

L'idée des preuves de travail est due à Cynthia Dwork et Moni Naor qui, dès 1993, suggérèrent cette méthode pour lutter contre les spams. Le système *Hashcash* conçu par Adam Back en 1997 (indépendamment de C. Dwork et M. Naor) et servant aujourd'hui de base dans la plupart des mises en œuvre pratiques des preuves de travail, utilise des « fonctions à sens unique » pour définir les problèmes soumis et en contrôler finement la difficulté *(voir l'encadré 2 pour des exemples)*.

Une fonction f à sens unique se calcule facilement, mais s'inverse difficilement. Autrement dit, il est rapide de passer de x à $f(x) = y$, mais difficile de trouver, à partir d'un y donné, un x tel que $y = f(x)$. On exigera souvent aussi que les valeurs de $f(x)$ quand x varie se présentent comme si elles étaient tirées au hasard.

Fonctions à sens unique, avec ou sans paramètre

Si l'on dispose d'une telle fonction f, on en déduit facilement une preuve de travail : le service S choisit un y et exige du demandeur D qu'il trouve un x tel que $f(x) = y$. Le demandeur ne peut guère faire mieux qu'essayer des valeurs de x, jusqu'à trouver la bonne, ce qui est impossible à faire rapidement. Il s'agit ici d'une impossibilité pratique : trouver le x est possible en essayant de manière ordonnée toutes les x envisageables, mais cela nécessite du temps.

Plus subtil, car cela ne demande pas l'intervention de S pour la formulation du problème (donc utilisable pour les preuves de travail sans échange), on utilise une fonction à sens unique dépendant d'un paramètre p, $f_p(x)$, et dont le résultat, y, peut être interprété comme un nombre réel positif. Une telle interprétation est toujours possible : on écrit y en binaire, par exemple 01001110, et on assimile cette suite de 0 et de 1 au nombre réel dont l'écriture en base 2 est 0,01001110. Le service S attend que D lui propose un x tel que $f_p(x) < y$, où p est par exemple le message que D veut envoyer et y un nombre réel, appelé seuil, fixé à l'avance par S. La valeur de y détermine très précisément la difficulté de la preuve de travail, car plus y est petit, plus il est difficile de trouver un x convenable.

Les preuves de travail fournissent aussi un moyen simple d'organiser des courses entre machines sur un réseau. Or ces courses sont au cœur des protocoles de fonctionnement des cryptomonnaies.

Ces monnaies, dont le *bitcoin* est l'exemple le plus connu, fonctionnent sans autorité centrale, la gestion des comptes étant opérée par les machines des volontaires qui se contrôlent mutuellement. Ces contrôles empêchent toute manipulation du cahier de compte de la monnaie (la « blockchain »), lequel indique qui détient des devises *(voir Pour la Science, décembre 2013)*.

1. L'idée des preuves de travail

Pour limiter le pouvoir de nuisance que chacun possède du fait de la puissance de son ordinateur, on peut soumettre des énigmes obligeant les machines à de longs calculs et dont seul l'aboutissement leur donne le droit de mener une action, comme envoyer un message électronique ou accéder à un service en ligne. Une machine soumise à ces énigmes ne pourra pas envoyer des milliers de messages non sollicités (spams), ou participer à une tentative de mise en panne d'un service informatique en le submergeant de requêtes (attaque par déni de service).

Le temps de calcul imposé est un prix à payer pour que l'ordinateur acquière le droit de mener une action. Il doit travailler et le prouver par un résultat. La solution produite est la preuve qu'il a fourni ce travail. C'est l'idée des « preuves de travail ».

Les problèmes qu'on demande de résoudre pour ces défis doivent être asymétriques. Il faut que le calcul de la solution prenne du temps, mais que la vérification soit rapide ; sinon, celui qui se protégerait par les preuves de travail serait autant ennuyé que ceux dont il tenterait de se protéger.

On connaît une multitude de problèmes asymétriques. En voici deux exemples :

– L'entier b étant fixé, et p étant un grand nombre premier, trouver un nombre a tel que $a^2 = b \bmod p$. Ce problème de la « racine carrée modulo un grand nombre premier » a été proposé comme preuve de travail dès 1993 par Cynthia Dwork et Moni Naor.

– Trouver les deux nombres premiers p et q dont le produit est le nombre n qu'on vous a donné sans vous avoir dévoilé p ni q. Il est facile de formuler de telles énigmes – on multiplie deux grands nombres premiers entre eux, ce qui produit n – mais aucun algorithme de factorisation rapide n'est connu, et il faut donc du temps pour retrouver p et q à celui qui ne connaît que n. Il ne faut pas prendre p et q trop grands, car le problème de la factorisation de n deviendrait impossible à résoudre en un temps raisonnable.

Un troisième exemple – le plus important, car le plus utilisé – est expliqué en détail dans les encadrés 2 et 3 et se fonde sur les fonctions « à sens unique ».

Jean-Michel Ilmé

Pour qu'il y ait un intérêt pratique à participer à ce contrôle collectif sans lequel la cryptomonnaie n'existe plus, une récompense est donnée à intervalles réguliers à l'une des machines tenant les comptes. Aujourd'hui par exemple, 25 *bitcoins* sont distribués toutes les dix minutes par le protocole *Bitcoin*. Cette machine gagnante est désignée par un procédé fondé sur une preuve de travail dont le fonctionnement doit être parfait pour que le protocole résiste aux attaques. C'est la plus belle application à ce jour de l'idée des preuves de travail, et de nombreuses caractéristiques de *Bitcoin* en dépendent. Donnons quelques précisions.

Chaque machine candidate essaie de résoudre un problème dont les paramètres sont fixés par le protocole *Bitcoin* et qui est formulé sans intervention d'un service centralisé. Il s'agit d'un problème du type « trouver un x tel que $f_p(x) < y$ » évoqué plus haut. La fonction f à sens unique est connue de tous, et c'est la fonction de hachage SHA-256. On l'utilise beaucoup en cryptographie et les spécialistes s'accordent à considérer qu'elle a les propriétés voulues pour servir dans une preuve de travail. La première machine qui résout le problème gagne la compétition et emporte les 25 *bitcoins*. Le protocole ajuste régulièrement le seuil donné par le nombre y, qui fixe la difficulté de la preuve de travail en prenant en compte les concours précédents, de telle façon que le temps moyen entre deux concours soit de dix minutes environ.

Des preuves de travail pour les bitcoins

Cette émission contrôlée, prévisible et faible de *bitcoins* toutes les dix minutes est la seule façon d'en créer. Cela a pour intérêt que les détenteurs de *bitcoins* sont certains de ne pas être victimes des phénomènes inflationnistes provoqués par l'émission massive de devises, comme c'est parfois le cas pour les monnaies contrôlées par les banques centrales.

Participer à ce concours porte le nom de « minage », car le travail de calcul fait par les machines évoque celui d'un mineur dans une mine d'or, qui le conduit à s'enrichir s'il a la chance de trouver une pépite. Les informaticiens propriétaires des machines participant à ce concours permanent, répété toutes les dix minutes, se nomment entre eux des « mineurs ».

Il est important de comprendre que puisqu'il n'y a pas d'autorité centrale gérant les *bitcoins* (il en va de même pour les autres cryptomonnaies), l'acceptation de la preuve de travail se fait collectivement par tous les mineurs. Quand l'un d'eux a réussi à relever le défi de trouver un x tel que $f_p(x) < y$, il envoie un message sur le réseau, qui prévient les autres mineurs. Ceux-ci vérifient alors, chacun de son côté, que la solution proposée est correcte et se remettent au travail pour résoudre le défi suivant.

Le temps nécessaire pour qu'un gagnant soit trouvé n'est pas fixé avec précision : la

2. Le hachage

Une fonction de hachage associe, à un x donné (une suite de caractères ou un nombre) de longueur quelconque une valeur $f(x)$ de taille fixe nommée « empreinte de x » ou « condensé de x » ou *hash*. Le passage de x à $f(x)$ se fait par une série d'opérations qui commencent en général en découpant x en petits morceaux (d'où le nom de hachage), qui sont ensuite rassemblés et emmêlés de façon à obtenir un mélange aussi parfait que possible. Pour la fonction classique de hachage SHA-256, la longueur de $f(x)$ est de 256 bits ; il y a donc $2^{256} = 1{,}157 \times 10^{77}$ valeurs possibles, ce qui est considérable.

Les fonctions de hachage à usage cryptographique ont les propriétés suivantes.

(a) Elles sont « à sens unique » : le passage de x à $f(x)$ se calcule facilement et rapidement, mais pour un y donné, trouver un x tel que $y = f(x)$ est impossible en pratique.

(b) Il est impossible en pratique de trouver deux valeurs x et x' différentes telles que $f(x) = f(x')$.

(c) Elles produisent des valeurs assimilables à des valeurs aléatoires uniformes (prises dans l'ensemble des valeurs possibles) et, en particulier, même si x et x' sont deux suites de caractères n'ayant qu'un seul caractère différent, les valeurs $f(x)$ et $f(x')$ n'ont aucun lien apparent.

Voici un exemple. La donnée x est transformée en une suite de 0 et de 1 qui est découpée en morceaux de longueur 8. Les morceaux sont ensuite additionnés comme des nombres en base 2. On ne garde du résultat que les quatre chiffres en positions 3, 4, 5 et 6 à partir de la droite :

x=01010010100101010010010101 0 → 01010010 + 10010101 + 00100101 + 010 = 100001110 → $f(x)$ = 0011.

Cet exemple est bien sûr trop simple pour avoir les propriétés *(a)*, *(b)* et *(c)*. La fonction de hachage SHA-256 mélange soigneusement les bits de la donnée x selon un algorithme public (voir http://en.wikipedia.org/wiki/SHA-2).

Les fonctions de hachage cryptographiques ont de multiples usages dont voici trois exemples.

– Elles permettent d'assurer l'intégrité d'un gros fichier x, auquel on lui associera son empreinte $f(x)$, beaucoup plus courte. Celui qui téléchargera x s'assurera que x lui parvient sans erreur et en totalité en calculant l'empreinte du fichier qu'il aura reçu, qui doit être la même que celle publiée sur le site. Si x a mal été copié, il le saura, car la probabilité que la modification n'ait pas changé l'empreinte est infinitésimale.

– Au lieu de mémoriser les mots de passe d'accès aux comptes sur un service en ligne, celui-ci ne mémorise que les empreintes des mots de passe. Le serveur peut vérifier que les utilisateurs donnent les bons mots de passe, mais si un pirate accède à sa liste d'empreintes, il ne pourra rien en faire.

– Pour produire une suite de nombres aléatoires dépendant d'un fichier x, on calculera par exemple $f(x.1)$, $f(x.2)$,... où $x.i$ désigne le fichier x suivi de l'écriture du nombre i (par exemple en binaire). En changeant le x, on a autant de suites de nombres aléatoires qu'on veut (ce qui permet par exemple de chiffrer des messages).

L'importance des fonctions de hachage est telle, en cryptographie, qu'un grand soin est mis à les élaborer et à les soumettre à toutes sortes de tests et d'attaques. Le NIST, aux États-Unis, propose des fonctions bien contrôlées. La fonction SHA-256 utilisée par *Bitcoin* en est une. Le NIST publie aussi des recommandations concernant le choix et l'usage des fonctions de hachage. Il a récemment organisé une compétition pour concevoir une nouvelle génération de fonctions de hachage qui a abouti à la norme SHA-3 en 2012. Voir : http://www.nist.gov/itl/csd/ct/hash_competition.cfm.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

3. L'inversion d'une fonction de hachage

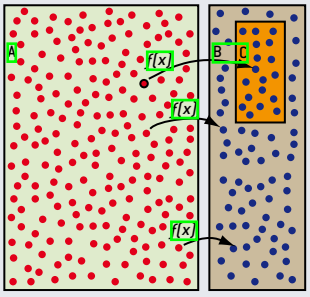
Explicitons une méthode pour définir et ajuster l'énigme d'une preuve de travail.

La fonction f de hachage transforme une suite x de 0 et de 1 de longueur quelconque en une autre, y, de longueur 256 (comme le SHA-256). Puisqu'il est impossible en pratique de trouver pour un y donné un x tel que $f(x) = y$ (inversion complète de f), on crée une énigme plus raisonnable et exigeant un travail faisable en ne demandant qu'une inversion partielle de f : trouver un x tel que $f(x)$ soit une suite de caractères commençant par k fois '0' (donc une suite de la forme 0 0 0 ... 0 a_1 a_2 a_3... a_n).

Plus k est grand, plus il sera difficile de trouver un x satisfaisant. On peut même être plus précis : pour trouver un tel x, il faut en moyenne essayer environ 2^k valeurs de x. L'énigme « trouver un x tel que $f(x)$ commence par dix fois '0' » exige donc environ $2^{10} = 1024$ calculs de $f(x)$. Pour 20 fois '0', il en faudrait un million environ. En choisissant k, on ajuste donc la difficulté de l'énigme qu'on formule. On a là une méthode rapide pour formuler des énigmes de « preuve de travail » dont la difficulté est facile à évaluer.

Dans les preuves de travail (pour se protéger des spams, ou interdire les attaques par déni de service), il faut éviter que les mêmes énigmes soient soumises plusieurs fois. Si c'était le cas, des bibliothèques de solutions seraient calculées par avance et les attaquants, au lieu de faire les calculs attendus, se contenteraient d'aller y puiser les solutions des problèmes qu'on leur soumet.

Pour éviter cela, on fait dépendre l'énigme posée d'un paramètre p. On demandera par exemple de trouver un x commençant par la chaîne $p = 0100011010100$ et tel que $f(x) < y$.



La fonction f envoie les éléments x de l'ensemble A (grand) dans l'ensemble B (petit). Inverser partiellement f, c'est trouver un élément x tel que $f(x)$ soit dans C. Plus C est petit, plus la tâche est difficile.

Le nombre de paramètres possibles p étant illimité, l'idée de constituer des bibliothèques de solutions calculées par avance n'est plus applicable.

Les énigmes possibles posées par la méthode de l'inversion partielle des fonctions de hachage sont donc à la fois parfaitement ajustables, et si nombreuses que celui à qui on les propose ne peut que se soumettre et faire le travail de les résoudre en essayant de très nombreux x, ce qui en moyenne lui prendra le temps qu'on aura choisi. Quand il aura trouvé la solution, il aura vraiment prouvé qu'il a travaillé !

Notons encore que si l'on est gêné par le fait que le temps de travail varie trop, selon que celui qui tente de résoudre le problème posé a de la chance ou pas (variance importante), on peut remplacer la demande de résoudre un problème, par la demande de résoudre plusieurs petits problèmes, ce qui a pour effet de diminuer la variance du temps nécessaire pour aboutir.

durée moyenne est de dix minutes, mais elle sera plus longue ou plus courte selon que les mineurs auront eu de la chance ou pas dans leur tentative de résolution du problème de la preuve de travail.

Une course folle à la puissance...

Si chaque machine n'utilisait que sa propre puissance pour gagner, la probabilité pour chacune de gagner serait proportionnelle à sa puissance. Cependant, comme la fonction f est fixée et connue de tous, le problème de trouver un x tel que $f_p(x) < y$ est très particulier. Les personnes intéressées par le minage des *bitcoins* se sont mises à utiliser des puces conçues spécialement pour résoudre rapidement le type particulier de problèmes posés dans les preuves de travail de *Bitcoin*. Une course folle à la puissance de minage en a résulté, conduisant à une véritable industrie du minage !

La puissance de minage d'un système informatique se mesure en comptant le nombre de calculs de type $x \to f(x)$ que le système est capable de faire par seconde, pour la fonction SHA-256. On est ainsi passé de 24×10^{12} calculs de valeurs de f par seconde pour l'ensemble des mineurs en janvier 2013 à 11×10^{15} en janvier 2014, soit une multiplication par plus de 500 en un an.

Le coût en électricité de ces minages (coût des « preuves de travail ») a été évalué. Certains ont calculé qu'il est de plus de dix millions d'euros par jour. C'est plus que la valeur des *bitcoins* gagnés chaque jour (environ deux millions d'euros). Les spécialistes ne sont pas d'accord sur ce nombre de dix millions, mais, même imprécis, il signifie qu'être mineur de *bitcoins* aujourd'hui n'est pas nécessairement rentable. Acheter du matériel et dépenser de l'électricité en le faisant fonctionner est un pari risqué, dont le succès dépend de deux facteurs très difficiles à contrôler ou même à anticiper : la puissance de calcul de vos concurrents, et le cours extrêmement volatil du *bitcoin*.

Notons que certains pirates informatiques ont conçu des programmes, nommés chevaux de Troie, qui s'installent par le biais du réseau sur une multitude d'ordinateurs (le vôtre peut-être) et leur font exécuter le minage. Bien évidemment, lorsque le minage réussit, la solution est transmise au pirate qui, pour son propre compte, touche les 25 *bitcoins*. C'est vous qui payez l'électricité, mais c'est lui qui empoche le bénéfice !

...et un énorme gâchis ?

Parmi les nombreuses critiques formulées à l'encontre de *Bitcoin*, l'une d'elles concerne justement les preuves de travail qui définissent le minage. Les sommes d'argent considérables dépensées en électricité et pour fabriquer du matériel spécialisé calculant le plus rapidement possible des $f_p(x)$ semblent absurdes, car en soi de tels calculs ne servent à rien. N'est-ce pas là un gâchis terrifiant, engendrant par ailleurs une importante pollution liée à l'électricité consommée, qu'il faut bien produire ?

Une double réponse a été donnée à cette critique. D'une part, il a été répliqué

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

que les moyens dépensés pour le minage n'étaient pas vains, puisqu'ils permettent à ces monnaies de fonctionner. Fabriquer des billets de banques, les transporter dans des véhicules blindés, les enfermer dans des coffres que l'on fait garder : tout cela coûte cher et pourtant personne ne conteste la nécessité de ces dépenses puisqu'elles servent à faire fonctionner les monnaies fiduciaires habituelles émises par les banques centrales. Le *bitcoin* n'a pas besoin d'être imprimé (c'est une monnaie numérique), il n'y a pas besoin de voitures blindées pour son transport, mais il faut que sa gestion soit assurée. Le minage assure en partie cette gestion, qui n'est donc que l'équivalent des dépenses de fonctionnement des autres monnaies et n'a finalement rien d'absurde.

Concevoir des preuves de travail utiles

L'autre réponse est plus intéressante, elle est aujourd'hui encore en discussion. Les preuves de travail les plus habituelles (dont celle utilisée par *Bitcoin*) consistent à faire des calculs pour résoudre un problème qui, malheureusement, est sans intérêt réel : une fois que l'on a trouvé un x tel que $f_p(x) < y$, ce x n'est utile à personne et ne le sera sans doute jamais. Ne pourrait-on pas concevoir des preuves de travail fondées sur des problèmes dont la solution serait utile ?

On le sait, les mathématiciens aiment les nombres premiers dont la connaissance progresse et est utile (en particulier en cryptographie !). Divers groupes de nombres premiers sont jugés intéressants. Les paires de nombres premiers jumeaux sont les paires $(p, p + 2)$ de nombres premiers ayant un écart de deux unités, par exemple (17, 19). On cherche toujours à prouver qu'il en existe une infinité. Il y a aussi les paires de nombres premiers de Sophie Germain (mathématicienne française qui vécut de 1776 à 1831) qui sont de la forme $(p, 2p + 1)$, par exemple (3, 7), (5, 11), (11, 23). Elles conduisent aux chaînes de Cunningham $(p_1, p_2, ..., p_k)$ où chaque couple (p_i, p_{i+1}) est une paire de nombres de Sophie Germain : $p_2 = 2p_1 + 1$, $p_3 = 2p_2 + 1$, ..., $p_{k+1} = 2p_k + 1$, chaque p_i étant un nombre premier.

Des chercheurs tiennent à jour des sites Internet qui indiquent les records de longueur des chaînes de Cunningham. Sunny King a montré en 2013 qu'une telle recherche peut servir de base à des preuves de travail aux propriétés à peu près équivalentes à celles provenant des fonctions à sens unique.

S. King a créé en juillet 2013 sa propre cryptomonnaie, *Primecoin*, proche dans sa conception de *Bitcoin*, mais utilisant des preuves de travail qui conduisent à des chaînes de Cunningham nouvelles. Des chaînes de Cunningham records, de longueur 10, 11, 12 et 13, ont ainsi été découvertes, ce qui prouve l'efficacité de la méthode proposée et sa capacité à contribuer à la recherche mathématique.

Précisons toutefois que l'intérêt de connaître des chaînes de Cunningham n'est pas très grand, et que la sûreté des preuves de travail fondées sur leur recherche n'est pas aussi bonne que celle des preuves de travail fondées sur les fonctions à sens unique. Les utilisateurs des cryptomonnaies ont cependant fait bon accueil à cette nouveauté. Parmi toutes les cryptomonnaies existantes (il y en a aujourd'hui plus de 80, voir http://coinmarketcap.com/), *Primecoin* se classe onzième pour la capitalisation. Le total des *primecoins* émis vaut dix millions de dollars (le 7 février 2014). Qui a dit que les mathématiques n'étaient pas un bon moyen de gagner de l'argent ?

Un autre projet en cours de développement, nommé *Curecoin,* tente de concevoir une preuve de travail (et une cryptomonnaie associée) qui soit beaucoup plus clairement utile. Le calcul mené par les machines de-

4. Des preuves de travail utiles

Les preuves de travail utilisées aujourd'hui ont un côté absurde : on demande aux ordinateurs de résoudre des problèmes mathématiques qui n'ont aucun intérêt. Sunny King (pseudonyme d'une personne ou d'un groupe) a conçu une preuve de travail aussi facile à ajuster que l'inversion partielle des fonctions de hachage cryptographiques et qui permet de trouver des chaînes de nombres premiers intéressantes : les chaînes de Cunningham.

Ce sont des suites de nombres premiers $(p_1, p_2, ..., p_k)$ vérifiant : $p_2 = 2p_1 + 1$, $p_3 = 2p_2 + 1$, ..., $p_{k+1} = 2p_k + 1$. Ces chaînes de Cunningham sont reliées aux nombres premiers de Sophie Germain, une mathématicienne française (1776-1831) : un nombre premier p est un nombre premier de Sophie Germain si $2p + 1$ est aussi un nombre premier.

Ces nombres premiers particuliers ont un intérêt en raison d'un théorème de Sophie Germain lié au théorème de Fermat. Dans les chaînes de Cunningham, tous les nombres sont des nombres de Sophie Germain, sauf le dernier.

L'utilisation de ces preuves de travail où l'on recherche des nombres premiers est au cœur du fonctionnement de la cryptomonnaie *Primecoin*, concurrente de *Bitcoin*. Le travail de minage de *Primecoin* a aujourd'hui produit plusieurs chaînes nouvelles intéressantes. La chaîne de Cunningham de longueur 11 comportant les plus grands nombres premiers est l'une d'elles. Le premier nombre de cette chaîne record découverte le 3 août 2013 comporte plus de 200 chiffres. Il s'écrit :
$p_1 = k \times 151\# - 1$,
où k = 73 853 903 764 168 979 088 206 401 473 739 410 396 455 001 112 581 722 569 026 969 860 983 656 346 568 919
et où 151# désigne le produit des nombres premiers inférieurs ou égaux à 151 (voir http://users.cybercity.dk/~dsl522332/math/Cunningham_Chain_records.htm).

Sophie Germain à l'âge de 14 ans, portrait de Auguste Eugène Leray.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

© Thomas Bolognesi

Master 2

Économie
Énergie
Développement Durable

FACULTÉ d'ÉCONOMIE de GRENOBLE

Deux parcours distincts

• **Le master Professionnel** forme de futurs cadres spécialistes de l'énergie pour des entreprises énergétiques, des grandes entreprises hors énergie, des cabinets de consultants, des collectivités territoriales et des organismes internationaux.

• **Le master Recherche** initie l'étudiant à la recherche en vue de son admission en thèse.

CONTENU

1er semestre : commun aux parcours Professionnel et Recherche

Fondamentaux de l'énergie
Climat et énergie
Marchés énergétiques internationaux
Industries de réseau
Stratégies et politiques d'innovation
Anglais pour l'énergie / autre langue vivante

2e semestre, parcours Professionnel

Institutions internationales et énergie
Politiques territoriales énergie-climat
Approches sectorielle et technologique énergie-climat
Stage

2e semestre, parcours Recherche

Economie de l'énergie
Environnement et innovation
Approches expérimentales
Mémoire

DÉBOUCHÉS

Chargé de mission ou de projets énergie
Analyste de marché énergétique
Responsable énergie
Expert-conseil énergie-climat
Economiste de l'énergie et de l'environnement
Enseignant-chercheur

INTERVENANTS

Conférenciers de renom
Enseignants et chercheurs de l'équipe Economie du Développement Durable et de l'Energie (CNRS-PACTE-EDDEN) et de Grenoble Applied Economics Laboratory (INRA-GAEL)

Les + du Master 2 EEDD

- Formation présentielle en alternance
- Formation à distance
- Large réseau de partenaires

POUR PLUS D'INFORMATION

http://www.upmf-grenoble.fr/master2-EEDD
contact : odile.blanchard@upmf-grenoble.fr

Université Pierre-Mendès-France
Faculté d'Économie
1241 rue des Résidences
F - 38400 Saint-Martin-d'Hères

upmf Grenoble Université Pierre Mendès France Sciences sociales & humaines

L'AUTEUR

J.-P. DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

S. King, **Primecoin : Cryptocurrency with prime number proof-of-work**, 2013 : http://primecoin.org/static/primecoin-paper.pdf

R. Alexander, **Determining electrical cost of Bitcoin mining,** *Bitcoin Magazine*, 18 déc. 2013 : http://bitcoinmagazine.com/8994/determining-electrical-cost-bitcoin-mining/

N. Popper, **Into the bitcoin mines**, *New York Times*, 12 décembre 2013 : http://dealbook.nytimes.com/2013/12/21/into-the-bitcoin-mines/

J.-P. Delahaye, ***Bitcoin*, la cryptomonnaie**, *Pour la Science* n° 434, décembre 2013.

Wikibooks, **Les fonctions de hachage cryptographiques,** http://fr.wikibooks.org/wiki/Les_fonctions_de_hachage_cryptographiques

A. Back, ***Hashcash*, a Denial of Service Counter-Measure**, 2002 ftp://sunsite.icm.edu.pl/site/replay.old/programs/hashcash/hashcash.pdf

C. Dwork et M. Naor, **Pricing via processing or combatting junk mail**, *Advances in Cryptology*, CRYPTO' 92, Lecture Notes in Computer Science, vol. 740, pp. 139-147, 1993.

vrait aider à découvrir comment se replient diverses protéines, ce qui, pour certaines d'entre elles, serait utile en médecine.

Les preuves de travail sont, on le voit, au cœur d'une petite révolution dont le succès, s'il se confirme, conduira à faire que les calculs réalisés pour la gestion des monnaies cryptographiques serviront la recherche mathématique ou médicale… ce qui n'est bien sûr pas le cas du transport des billets de banque, ni de la fabrication des coffres-forts.

Des jeux « prouvablement équitables »

Le monde des cryptomonnaies, avec ses preuves de travail à base de fonctions à sens unique, a amené la mise en place de casinos en ligne qui ne peuvent pas tricher, chose que le joueur lui-même vérifie sans intervention d'aucune autorité centrale.

Puisque le minage détermine un gagnant parmi les machines participantes et qu'on ne peut pas tricher (sous réserve que la fonction f utilisée possède bien les propriétés requises), on pourrait concevoir des jeux de hasard fondés directement sur le protocole de désignation d'un gagnant de 25 *bitcoins* toutes les dix minutes. Cependant, les chances de gagner d'un joueur dépendraient de la puissance de calcul de sa machine, ce qui ne serait pas juste.

Il existe des méthodes plus directes conduisant à des tirages au hasard parfaitement équitables et contrôlables pour, par exemple, lancer des dés en ligne sans qu'aucune tricherie ne soit possible, ni pour le casino ni pour le joueur. Ces protocoles sont connus depuis longtemps en cryptographie (Manuel Blum a proposé une méthode de tirage à pile ou face par téléphone en 1981), mais c'est seulement depuis peu que des casinos en ligne proposent aux joueurs des jeux « prouvablement équitables ». On peut donc aujourd'hui jouer en ligne à des jeux de hasard dont l'honnêteté est garantie par la cryptographie mathématique, et cela sans faire intervenir aucune autorité de contrôle des casinos auxquels on se connecte. Le paiement des taxes dues par le casino et son honnêteté commerciale (le casino paye-t-il toujours ce qu'il doit aux joueurs ?) ne sont pas garantis par ces protocoles, qui ne concernent que le hasard des tirages aléatoires.

Voici, ci-dessous, un protocole réalisant un tirage au sort ayant une chance sur k de réussir (k étant un entier supérieur ou égal à 2). Pour jouer, vous engagerez la somme S ; si le tirage vous est défavorable, le casino gardera votre mise ; si vous gagnez, le casino vous rendra votre mise, y ajoutera $(k-1)S$, et enlèvera par exemple un pour cent du total pour ses frais.

Protocole prouvablement équitable pour effectuer un tirage ayant une chance sur k de réussir (on prendra k = 2 pour simuler un lancer de pièce à pile ou face).

1) Le casino choisit un nombre x, et envoie le résultat du calcul de $f(x) = y$ au joueur. La fonction f est une fonction à sens unique produisant des résultats assimilables à du hasard, comme c'est le cas de la fonction SHA-256 utilisée par *Bitcoin*.

2) Le joueur envoie au casino un nombre z qu'il choisit comme il veut, éventuellement avec l'aide de son ordinateur.

3) Le casino calcule $t = x + z$, puis $u = f(t) \bmod k$ (le reste de la division de $f(t)$ par k).

4) Si $u = 0$, le joueur a gagné, sinon il a perdu.

5) Après le tirage, le casino fait parvenir x au joueur. Le joueur contrôle que le casino n'a pas triché en vérifiant que le y qu'il avait reçu avant de choisir z est bien $f(x)$; il contrôle aussi les calculs de $t = x + z$ et de $u = f(t) \bmod k$.

Le casino n'a pas pu manipuler le résultat, car, quand il a choisi x, il ne connaissait pas z. Le joueur n'a lui non plus pas pu manipuler le résultat, car, quand il a choisi z, il ne connaissait pas x. Le protocole est donc équitable et il n'existe aucune possibilité de tricherie, ni pour le casino ni pour le joueur.

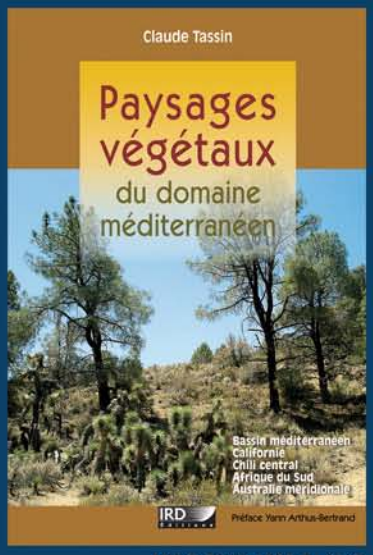
Les outils de la cryptographie mathématique semblent concerner de plus en plus d'aspects de la vie économique et numérique. Les protocoles à base de preuves de travail et de fonctions à sens unique non seulement conduisent à mieux contrôler ce qui se passe sur les réseaux, mais ouvrent aussi des perspectives nouvelles, comme celles des cryptomonnaies et des jeux prouvablement équitables. ■

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

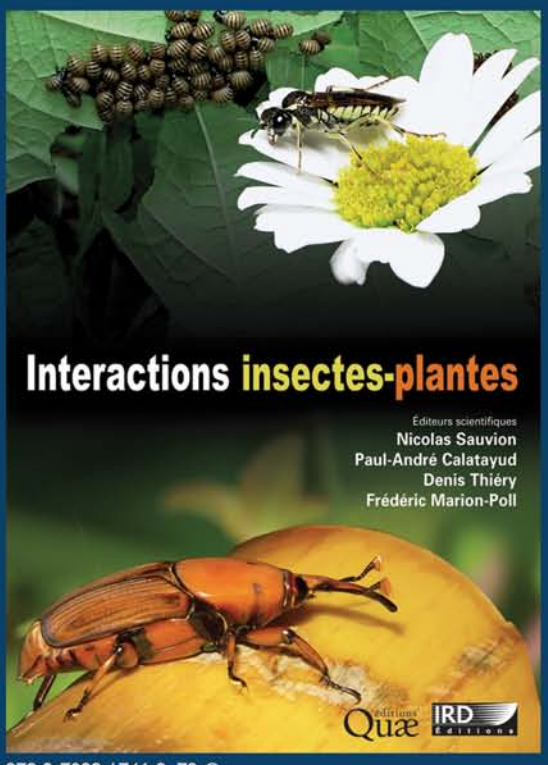
IRD Éditions

Institut de recherche pour le développement

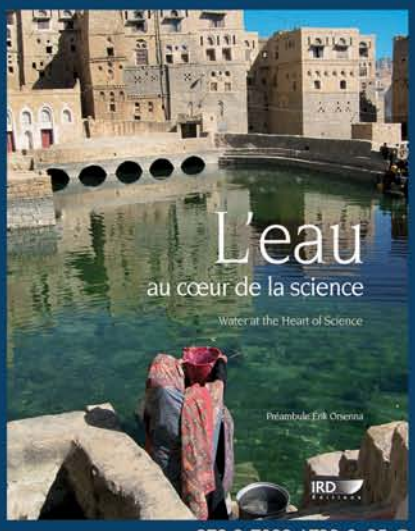
Un éditeur pour le développement



978-2-7099-1731-5 45 €

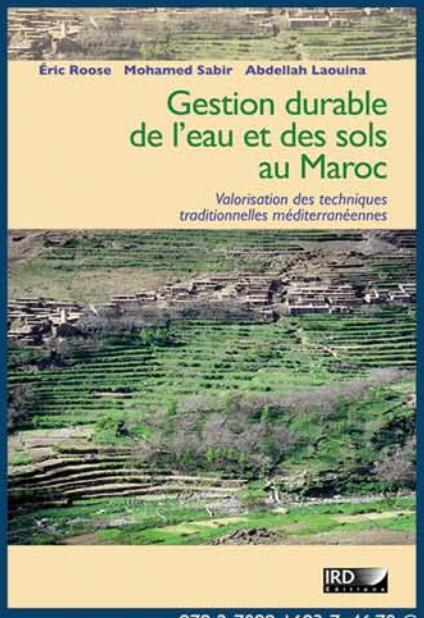


978-2-7099-1746-9 79 €

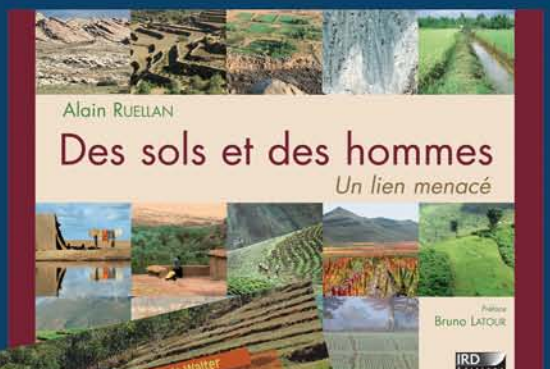


978-2-7099-1723-0 35 €

978-2-7099-1696-7 35,50 €

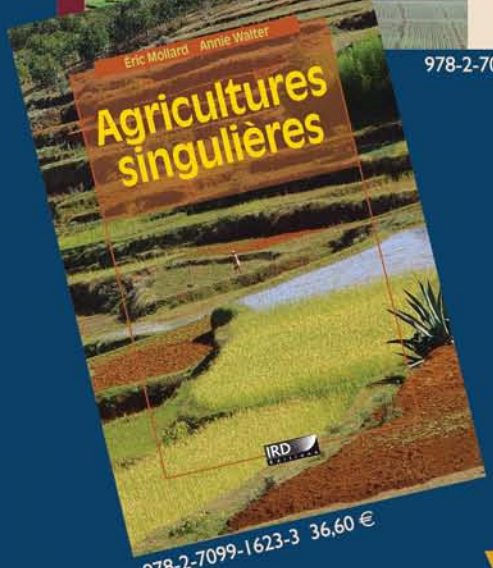


978-2-7099-1683-7 46,70 €



978-2-7099-1690-5 28,40 €

978-2-7099-1738-4 42 €



978-2-7099-1623-3 36,60 €

Diffusion libraires
Eyrolles/Géodif

Vente par correspondance
IRD Diffusion
32, av. Varagnat
F 93143 Bondy cedex
diffusion@ird.fr

www.edition.ird.fr

HISTOIRE DES SCIENCES

Le monde givré de Bernardin de Saint-Pierre

En 1784, s'opposant à l'idée d'une mer libre au pôle Nord, l'écrivain Bernardin de Saint-Pierre imagina d'énormes masses de glaces polaires dont les cycles de fonte auraient régi la Terre. Il inspira tant les écrivains que les scientifiques.

Frédérique Rémy

À la fin du XVIII[e] siècle, les pôles terrestres et leurs glaces sont peu connus. On imagine le pôle Nord comme une mer libre entourée d'une épaisse barrière de glace, infranchissable. Le mythe s'est forgé à partir de vieilles croyances et de certains récits de voyage, étayés par les naturalistes et autres savants du XVIII[e] siècle. Par exemple, pour le naturaliste Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon, qui n'imagine pas que la mer puisse geler, les glaces rencontrées par les marins ne peuvent venir que des continents, charriées par les grands fleuves de l'Arctique. Et à supposer que la mer puisse geler, le mathématicien et encyclopédiste Jean le Rond d'Alembert calcule que l'éclairage permanent du pôle Nord pendant l'été conduit à une température trop élevée pour que soit envisagée une formation de glace.

Le pôle Sud reste, quant à lui, totalement inconnu. Dans les années 1770, le marin anglais James Cook a réalisé la première circumnavigation australe et déclaré à son retour qu'il ne pouvait y avoir de continent vivable plus au Sud. Autant dire que l'on ne connaissait rien des régions polaires et que l'on avait peu d'idées sur la quantité de glace qui s'y trouvait.

En 1784, Jacques-Henri Bernardin de Saint-Pierre a 47 ans. Ingénieur de formation, il a été militaire, a voyagé et fréquenté les salons. Depuis quelques années, il essaie d'écrire, sans grand succès. Toutefois, le vent tourne lorsqu'il publie ses *Études de la nature*, mélange de raisonnement scientifique, d'anecdotes et de souvenirs personnels. Il y bâtit un système cosmogonique extravagant, mais étonnamment cohérent, dont le rôle principal, poussé à l'extrême, est tenu par les glaces polaires.

Les *Études de la nature* ont un succès indéniable. La première édition parue en décembre 1784 est épuisée dès l'année suivante et le livre est réédité plusieurs fois, assurant une notoriété durable à l'auteur. Son roman *Paul et Virginie* est publié quatre ans plus tard. Le système complexe imaginé par Bernardin est fortement critiqué par les scientifiques. Néanmoins, il porte, plus ou moins bien agencés, tous les ingrédients pour influencer durant de nombreuses décennies tant les écrivains que les scientifiques.

Les glaces de Bernardin

Pourquoi tant de glace chez Bernardin ? L'écrivain a sans doute été influencé par Buffon, pour qui la Terre se refroidissait. Selon le naturaliste, les glaces polaires donnaient une image de ce que serait le monde une fois refroidi. Il avait demandé aux géographes, marins et cartographes de l'époque de noter la position de toutes les glaces polaires rencontrées afin d'en suivre l'évolution et d'estimer la vitesse d'englacement de la Terre. Sa vision a beaucoup marqué l'époque, en particulier l'écrivain.

Bernardin est probablement le premier à imaginer une masse considérable de glace autour des pôles, dont « l'effusion » – ainsi nomme-t-il la fonte – contrôle au fil des jours et des saisons tout le système terrestre. Au cours de la journée et de l'année, un pôle est alternativement plus éclairé que l'autre. Ses glaces fondent alors, entraînant une importante masse d'eau vers l'équateur. La fonte diurne entraîne les marées, la fonte annuelle les courants océaniques.

Le système est complexe : ainsi, ce n'est pas l'effusion du jour qui entraîne la marée sur les côtes, mais la succession des effusions, qui, comme « une file de billes placées sur un billard », se propage. Au cours de la saison, la « coupole glaciale du pôle en fusion diminue chaque jour de diamètre », affaiblissant ainsi la puissance du courant, ce qui explique le déphasage de 24 minutes entre deux marées. Les grands courants océaniques sont aussi contrôlés par les glaces : « Les pôles me paraissent être les sources de la mer comme les montagnes à glaces sont les sources des fleuves. »

À partir du chemin parcouru par des épaves de bateaux échoués lors d'un mois de juin en mer du Nord, Bernardin déduit que la vitesse des courants d'été atteint plus de 30 lieues (120 kilomètres) par jour. Un tel courant ne peut qu'être engendré par l'effusion des glaces polaires. Six mois plus tard, les courants sont inversés et remontent vers le Nord en provoquant, entre autres, la mousson. Depuis les travaux d'Isaac Newton (1643-1727), on connaît la cause des marées (l'attraction gravitationnelle exer-

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

cée par la Lune et le Soleil sur les masses d'eau). Et depuis quelques années, les principaux courants marins ont été cartographiés (dont le Gulf Stream, en 1770 par Benjamin Franklin), fournissant des tracés qui ne correspondent pas forcément aux idées de Bernardin. Mais Bernardin a une force de conviction exceptionnelle et l'on voit, avec son système, la Terre respirer et être périodiquement nettoyée et régénérée.

Une coupole large de 2 000 lieues

Afin d'appuyer son propos, Bernardin va jusqu'à évaluer le volume des glaces polaires – et ce à partir de trois méthodes. Pour lui, la forme en œuf de la Terre, déduite de son ombre sur la Lune pendant une éclipse, vient d'une excroissance polaire due à la présence d'immenses masses de glace, ce qui permet d'évaluer leur taille. Une autre méthode peut être appliquée aux glaces de l'hémisphère Nord : Bernardin extrapole l'épaisseur de la couche de neige pendant l'hiver en fonction de la latitude : quelques pouces en France, quelques pieds en Allemagne, quelques toises en Russie…soit quelques centaines de pieds au-delà du cercle polaire ! Pour l'hémisphère Sud, faute de pouvoir s'appuyer sur des relevés similaires, il fonde son évaluation sur la vitesse des courants. Par analogie avec la vitesse des fleuves à leur embouchure et leur dénivelé, il déduit la hauteur de glace de la vitesse des courants marins. Il propose aussi d'utiliser l'intensité des aurores boréales, causées, pense-t-il, par la réfraction de la glace polaire, pour calculer la surface des glaces.

Toujours est-il qu'en dépit d'un manque évident de culture scientifique et d'erreurs de raisonnement, il en arrive à envisager des coupoles de glace de 2 000 lieues de diamètre (8 000 kilomètres) pourvues de flèches de 10 lieues (40 kilomètres) de hauteur, centrées sur chacun des pôles et présentes en alternance. Même si ces chiffres paraissent démesurés à l'époque, ils ne sont pas complètement déraisonnables, sachant que l'Antarctique a un diamètre moyen de 2 000 kilomètres et une épaisseur de quelques kilomètres.

LC-USZ62-126744 | Prints and Photographs Division | Library of Congress | DR

DANS SON OUVRAGE
Études de la nature (1784), Jacques-Henri Bernardin de Saint-Pierre (1737-1814), *ci-contre,* décrit la Terre comme un système complexe gouverné par les cycles de glaciation et de fonte de « coupoles » de glace aux pôles. Selon Bernardin, en fondant alternativement en fonction de leur exposition au soleil, les glaces des pôles seraient notamment responsables de l'apparition de courants océaniques *(ci-dessous, représentés pour les mois de janvier et février, soit durant l'été austral).*

J.-H. Bernardin de Saint-Pierre, *Études de la nature*, 1784

Pour Bernardin, de telles masses de glace ne peuvent qu'avoir de fortes conséquences sur le système terrestre. En particulier, elles doivent influer sur le niveau de la mer et la rotation de la Terre. Par sa chaleur, le Soleil augmente les effusions polaires et, par conséquent, le volume de l'eau. Il explique ainsi le déluge : « Pour moi, si j'ose le dire, j'attribue le déluge universel à l'effusion totale des glaces polaires. » Il imagine le Soleil sortir de sa course habituelle, réchauffer les pôles et voit les vastes coupoles des glaces fumer de toutes parts… et leurs vapeurs couvrir alors « la Terre d'une pluie universelle » : « Ce fut alors que tous les plans de la nature furent renversés. Des îles entières de glaces flottantes, chargées d'ours blancs, vinrent s'échouer parmi les palmiers de la zone torride et les éléphants de l'Afrique furent roulés jusque dans les sapins de la Sibérie, où l'on trouve encore leurs grands ossements. »

Bernardin envisage aussi la montée des eaux que causerait la fonte de l'ensemble des glaces : « Qui doutera donc que l'effusion totale des glaces des deux pôles ne suffise pour surmonter les bassins de l'océan et submerger les deux continents en entier ? » Et pendant une dizaine de pages extravagantes, fourmillant de détails sur l'invasion de l'eau polaire, il anticipe sur l'avenir de la Terre après la fonte des glaces. L'écrivain Rétif de la Bretonne reprendra ce scénario en 1803 dans ses *Posthumes*, mais préférera imaginer les glaces fondre à cause de la chaleur engendrée par une comète capturée par la Terre.

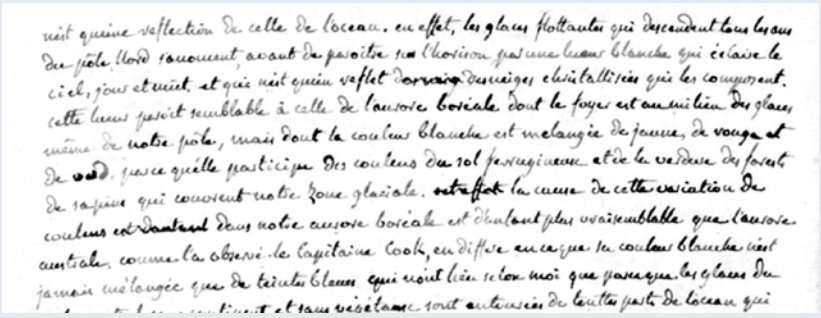
Les masses de glace de Bernardin sont telles qu'elles ne peuvent qu'agir sur le mouvement de la Terre : « Si la hauteur des glaces polaires est capable d'altérer dans les cieux la forme du globe, leur poids doit être considérable pour influer sur le mouvement dans l'écliptique [le plan contenant l'orbite terrestre]. » Il explique alors le « balancement » des pôles par rapport à l'écliptique par la fonte du pôle tourné vers le Soleil tandis que celui à l'opposé reconstruit sa coupole glaciaire. Ces basculements alternatifs de l'axe terrestre sont nécessaires à la vie, car, sinon, les pôles ne fondraient pas et les glaces s'y accumuleraient sans cesse en desséchant les océans. La Terre de Bernardin est vivante et les glaces sont le moteur de sa respiration.

Du déluge aux glaciations

Très critiqué par les scientifiques, le système de Bernardin n'a pas renversé le mythe de la mer libre du pôle Nord. Ce mythe a connu son apogée au milieu du XIX^{e} siècle, entraînant des dizaines d'expéditions, ainsi que des héros de romans, à la recherche de cette mer, et n'est tombé en désuétude qu'au début du XX^{e} siècle. Néanmoins, le système de Bernardin a influencé de façon durable les idées de nombreux écrivains et savants. Différents auteurs ont repris le scénario catastrophe de Bernardin, toujours autour du déluge. Quant aux savants, ils ont décliné les éléments de son scénario – la fonte des glaces, le déluge, le balancement de l'axe de rotation terrestre – pour expliquer notamment l'épineux problème du déluge, des déluges périodiques, puis, par un subtil glissement, les glaciations passées.

C'est ainsi que, adapté de Bernardin, le scénario du juriste Jean Delormel, publié en 1790, introduit un mécanisme susceptible d'entraîner des déluges périodiques : au départ, l'axe de la Terre est perpendiculaire à l'écliptique. Le climat est alors, selon lui, propice à l'expansion d'immenses calottes polaires. Pour une raison inconnue, l'axe de la Terre aurait basculé une première fois. La calotte davantage exposée au Soleil aurait fondu, ce qui aurait redressé l'axe terrestre. Une autre calotte se serait alors formée, ce qui aurait déstabilisé la planète et entraîné la fonte de la calotte la plus exposée, etc.

Les couleurs des glaces polaires



Les glaces flottantes qui descendent tous les ans du pôle Nord, s'annoncent, avant de paraître sur l'horizon, par une lueur blanche qui éclaire le ciel jour et nuit, et qui n'est qu'un reflet des neiges cristallisées qui les composent. Cette lueur paraît semblable à celle de l'aurore boréale, dont le foyer est au milieu des glaces mêmes de notre pôle, mais dont la couleur blanche est mélangée de jaune, de rouge et de vert, parce qu'elle participe des couleurs du sol ferrugineux et de la verdure des forêts de sapins qui couvrent notre zone glaciale. La cause de cette variation de couleurs dans notre aurore boréale est d'autant plus vraisemblable, que l'aurore australe, comme l'a observé le capitaine Cook, en diffère en ce que sa couleur blanche n'est jamais mélangée que de teintes bleues, qui n'ont lieu, selon moi, que parce que les glaces du pôle austral, sans continent et sans végétaux, sont entourées de toutes parts de l'océan qui est bleu. Ne voyons-nous pas que la lune, que nous supposons couverte en grande partie de glaciers très élevés, nous renvoie, en lumière d'un blanc bleuâtre, les rayons du soleil, qui sont dorés dans notre atmosphère ferrugineuse ? N'est-ce pas par la réverbération d'un sol composé de fer, que la planète de Mars nous réfléchit en tout temps une lumière rouge ? N'est-il pas plus naturel d'attribuer ces couleurs constantes aux réverbérations du sol, des mers et des végétaux de ces planètes, qu'aux réfractions variables des rayons du soleil dans leurs atmosphères ? […].

Jacques-Henri Bernardin de Saint-Pierre, *Harmonies de la nature*, 1796

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

Dès 1822, le mathématicien Joseph Adhémar s'attaque lui aussi au problème du déluge. Il a lu Bernardin, reprend les mêmes références, raconte les mêmes anecdotes et, surtout, lui emprunte son hypothèse de la fonte puissante des glaces polaires entraînant un flux d'eau extraordinaire qui recouvre tous les continents. En revanche, pour Adhémar, la cause de la fonte est la précession des équinoxes, c'est-à-dire le décalage des équinoxes au fil des ans, connu depuis l'Antiquité. Autrement dit, ce n'est pas la fonte des glaces qui modifie l'axe de rotation de la Terre, mais le mouvement de la Terre qui modifie la fonte des glaces.

La précession des équinoxes est due au changement de direction de l'axe de rotation de la Terre et influe donc sur la durée des saisons. À l'époque de Bernardin (et toujours aujourd'hui), l'orientation de l'axe de rotation de la Terre est telle que la planète est au plus près du Soleil pendant l'été austral (et l'hiver boréal). Aussi l'été austral est-il plus long que l'été boréal, et le climat boréal, plus froid. Les observations des XVII^{e} et XVIII^{e} siècles suggèrent une période d'environ 25 000 ans. Adhémar refait le calcul et trouve une période de 21 000 ans : tous les 10 500 ans, un hémisphère donné connaîtra un hiver plus long que l'autre.

Ainsi, la calotte de l'hémisphère qui connaît le plus long hiver grossit lentement, mais sûrement, et 10 500 ans plus tard, l'orbite terrestre est telle que cette calotte fond. L'eau se répand sur toute la Terre et provoque le déluge, tandis que se forme une autre calotte dans l'autre hémisphère, et ainsi de suite. Adhémar pense que cette énorme calotte attire par gravité les eaux vers elle, ce qui explique la différence de profondeur des océans austral et boréal. Il peut ainsi, lui aussi, estimer le volume de la calotte australe. Il trouve une hauteur de 20 lieues, soit environ 90 kilomètres. Publié en 1842, son calcul ne sera réellement lu et repris qu'après réédition, en 1860.

En 1840, le géologue suisse Louis Agassiz publie son *Étude sur les glaciers*, où il montre que les blocs erratiques (ou moraines) retrouvés çà et là, ou que les stries sur certains rochers, sont la preuve de glaciations passées. Peu à peu, dans le courant du siècle, l'hypothèse de glaciations répétées remplace celle du déluge. Le scénario est alors tout trouvé : la précession des équinoxes entraîne l'avancée périodique des glaces.

Cette année-là aussi, Sébastien Dumont d'Urville découvre l'Antarctique. Il ne connaît pas encore la taille de ce continent, mais, au fil des expéditions polaires, on prendra peu à peu conscience de la masse considérable de cette calotte polaire, pas si éloignée des estimations de Bernardin.

La nature est un immense réseau

La postérité a retenu qu'Adhémar était le découvreur de la cause des glaciations. Ne lui retirons pas le mérite d'avoir eu l'idée judicieuse du rôle de la précession des équinoxes dans les glaciations et d'avoir mathématisé le problème. Néanmoins, n'oublions pas qu'il recherchait surtout les causes du déluge et qu'il a emprunté à Bernardin son scénario. Enfin, pour expliquer les déluges périodiques, il a effectué un calcul tenté à la même époque par de nombreux autres savants, tel le philosophe Jean Reynaud, qui publia un tel calcul en 1841…

Ainsi, le rôle des glaces dans le système terrestre, que l'on sait si capital de nos jours, fut anticipé bien avant que l'on ne découvre les preuves de leur importance actuelle et passée. Certes, l'argumentation de Bernardin a de quoi laisser perplexe. Et en effet, l'écrivain a toujours été rejeté en tant que scientifique. Il a eu toutefois de remarquables intuitions. Il a combattu nombre d'idées fausses de l'époque, qu'il s'agisse du mythe de la mer libre de glace ou du refroidissement terrestre. Il a aussi eu une vision élaborée et complète du cycle de l'eau.

Enfin et surtout, il a bâti un système cohérent dans lequel tous les éléments terrestres se répondent. Pour Bernardin, chaque phénomène sur Terre est lié à un système complexe dont il est à la fois une cause et une conséquence. La nature est un immense réseau dont chaque composante est liée et imbriquée aux autres. Une vision plus que jamais d'actualité. ■

L'AUTEUR

Frédérique RÉMY, directrice de recherche au CNRS, est responsable de l'équipe « cryosphère » à l'Observatoire Midi-Pyrénées, à Toulouse.

À ÉCOUTER

Le jeudi 3 avril 2014, de 14h à 15h, Frédérique Rémy reviendra sur les glaces polaires imaginées par Bernardin de Saint-Pierre dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture*. **www.franceculture.com**

BIBLIOGRAPHIE

F. Rémy, **Le monde givré de Bernardin de Saint-Pierre**, dans J. Ducos (sous la dir.), **Météores et climats d'hier**, Hermann, pp. 81-96, 2013.

F. Rémy, **Histoire des pôles, Mythes et réalités polaires, XVII^{e}-XVIII^{e} siècles**, Desjonquères, 2009.

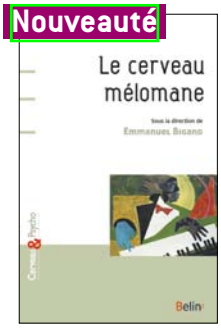
E. Bard, **Greenhouse effect and ice ages : historical perspective**, *C. R. Geoscience*, vol. 336, pp. 603-638, 2004.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

La sélection de livres POUR LA SCIENCE

Mathématiques, astronomie, aéronautique… Découvrez toutes les nouveautés 2014. Partez explorer l'univers des planètes et des étoiles, les systèmes dynamiques, la géométrie et bien d'autres sujets scientifiques…

Nouveauté



Le cerveau mélomane

Sous la direction d'Emmanuel Bigand — **Réf. 84245118**

La musique ne laisse personne indifférent et suscite de multiples émotions. Ce que l'on sait moins, c'est la puissance de la musique. Elle a des effets positifs sur les capacités cognitives et intellectuelles de ceux qui en écoutent souvent ou qui la pratiquent ; mais elle a aussi des effets thérapeutiques chez certains sujets.

Éditions Belin-Pour la Science 2013 – 200 pages – 21 euros – ISBN 978-2-8424-5118-9

Nouveauté

Les mille et une nuits de la science

Philippe Boulanger — **Réf. 70118964**

Quand Schéhérazade conte la science et les tribulations des savants ! Ce pastiche est une manière totalement originale de raconter la science, en abordant des sujets aussi divers que les mathématiques, la physique, la paléontologie, etc.

Éditions Belin 2014 – 160 pages – 15 euros – ISBN 978-2-7011-8964-2

Nouveauté

L'exploration des planètes

Thérèse Encrenaz et James Lequeux — **Réf. 70116195**

En retraçant la conquête pacifique du système solaire, ce livre met à la portée d'un large public les démarches et les résultats des générations d'astronomes qui se sont succédé depuis Galilée. Il ouvre sur une nouvelle dimension de la planétologie avec la découverte récente de près d'un millier d'exoplanètes… où peut-être d'autres formes de vie seront détectées ?

Éditions Belin 2014 – 224 pages – 23 euros – ISBN 978-2-7011-6195-2

Nouveauté

Concorde 001 et l'ombre de la Lune

Pierre Léna

Réf. 74650728*

Lors de l'éclipse totale du 30 juin 1973, sept scientifiques ont embarqué à bord de Concorde 001, prototype d'essais d'un avion extraordinaire qui sera le premier supersonique commercial. La science, la technique, l'aéronautique et l'histoire se marient dans le récit d'une aventure humaine singulière à bord d'un avion légendaire, illustré d'une iconographie riche et originale.

Éditions Le Pommier 2014 – 160 pages
17 euros – ISBN 978-2-7465-0728-9

Ce que disent les étoiles

Dannielle Briot et Noël Robichon

Réf. 70116285

Qu'est-ce qu'une étoile et par quel mécanisme brille-t-elle ? Comment naît une étoile, comment meurt-elle ? Qu'est-ce qu'un pulsar, une naine brune, une supernova ? Ce livre, signé de deux astronomes de l'Observatoire de Paris, propose un vaste panorama de l'astrophysique des étoiles en une trentaine de sujets de quatre pages chacun, abondamment illustrés de photographies époustouflantes.

Éditions Belin 2013 – 160 pages
25 euros – ISBN 978-2-7011-6285-0

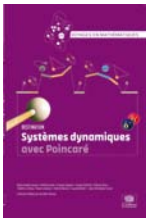
En partenariat avec les éditeurs

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777 — Éditions Le Pommier

Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie *
ou en renvoyant le bon de commande ci-contre.

* Pour commander les titres édités par *Le Pommier* : www.editions-belin.fr

À LIRE AUSSI…



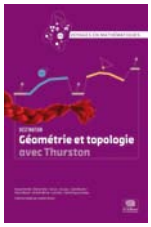
Destination Systèmes dynamiques avec Poincaré

Aurélien Alvarez (Dir.)

Réf. 74650707*

Prévoir l'avenir, calculer le futur… Vraiment ? ! Prédire le devenir d'un système en évolution au cours du temps n'est pas chose facile ! Henri Poincaré s'est très tôt passionné pour les systèmes dynamiques. Aujourd'hui, les mathématiciens étudient beaucoup de systèmes dynamiques de natures bien différentes les uns des autres…

Éditions Le Pommier 2013 – 160 pages
19 euros – ISBN 978-2-7465-0707-4



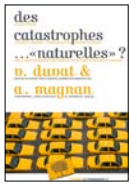
Destination Géométrie et topologie avec Thurston

Aurélien Alvarez (Dir.)

Réf. 74650708*

Topologie, géométrie, en petites dimensions ? S'appuyant sur des intuitions très géométriques, le mathématicien William Thurston a bouleversé notre façon d'appréhender les espaces de dimension 3. Son programme de recherche fut mené à son terme dans les années 2000 par le mathématicien Grigori Perelman d'une manière tout aussi grandiose !

Éditions Le Pommier 2013 – 160 pages
19 euros – ISBN 978-2-7465-0708-1



Des catastrophes… « naturelles » ?

Virginie Duvat et Alexandre Magnan

Réf. 74650679*

Xynthia, Katrina, Fukushima… Penser que les catastrophes naturelles sont la conséquence des colères de la nature et que nous n'y pouvons rien, c'est se voiler la face. Tempêtes, tremblements de terre et autres tsunamis ont certes une origine naturelle, mais les dégâts considérables qu'ils provoquent sont à mettre au crédit des sociétés humaines. Nous sommes des fabricants de catastrophes, pour le coup plus si « naturelles » que ça…

Éditions Le Pommier 2014 – 312 pages
23 euros – ISBN 978-2-7465-0679-4

La physique surprise

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlick

Réf. 84245121

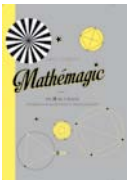
Passionnés de physique et curieux de tout, Jean-Michel Courty et Édouard Kierlick vous invitent à une nouvelle promenade sur ces chemins de traverse dans un langage accessible, simple et imagé, sans jargon ni formules. Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène physique que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer.

Éditions Belin-Pour la Science 2013
184 pages – 24 euros
ISBN 978-2-8424-5121-9

Mathémagic !

David Acheson

Réf. 70117686



De pi au pendule chaotique, de Pythagore à Andrew Wiles, embarquez pour une fascinante balade au pays des mathématiques ! De savoureuses illustrations achèveront de convaincre le profane comme l'initié qu'il s'agit là d'un des livres les plus réjouissants jamais écrits sur le sujet.

Éditions Belin 2013 – 176 pages
15 euros – ISBN 978-2-7011-7686-4

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

Les énigmes mathématiques du 3e millénaire

Keith Devlin

Réf. 74650704*

Éditions Le Pommier 2013
416 pages – 12 euros
ISBN 978-2-7465-0704-3

La complexité, vertiges et promesses

Réda Benkirane

Réf. 74650703*

Éditions Le Pommier 2013
416 pages – 12 euros
ISBN 978-2-7465-0703-6

Le cannabis ?

Marina Julienne

Réf. 70116380

Éditions Belin 2013
80 pages – 19 euros
ISBN 978-2-7011-6380-2

La procréation assistée ?

Lise Barnéoud

Réf. 70116144

Éditions Belin 2013
80 pages – 19 euros
ISBN 978-2-7011-6144-0

BON DE COMMANDE

À retourner accompagné de votre règlement à :
Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil
Tél. : 0 805 655 255 • e-mail : pourlascience@daudin.fr

POUR LA SCIENCE

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

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

J'indique mes coordonnées :

Nom :
Prénom :
Adresse :
C.P. : Ville :
Pays : Tél.* : (facultatif)
E-mail* : @
(pour recevoir la newsletter *Pour la Science* | à remplir en majuscules)

Je choisis mon mode de règlement :

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

Numéro
Date d'expiration
Cryptogramme

Signature obligatoire

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 ❑.**

DPL438 Offre valable jusqu'au 30/04/2014, dans la limite des stocks disponibles.

SCIENCE & FICTION

Le retour des Titans

Quand les scientifiques se penchent sur certaines productions cinématographiques, ils montrent que la science fait parfois la part trop belle à la fiction !

Roland Lehoucq et Jean-Sébastien Steyer

Si vous vous êtes un jour demandé à quoi ressemblerait une confrontation entre Goldorak et Godzilla, vous avez sans doute adoré *Pacific Rim*, film de Guillermo del Toro sorti sur les écrans durant l'été 2013. Des monstres géants issus d'un autre univers – les kaijus – piétinent sans vergogne les plus grandes cités du monde tandis que des robots titanesques – les jaegers – leur donnent la réplique, utilisant des cargos en guise de gourdin. Si jaegers et kaijus sont d'incontestables réussites esthétiques, nul n'est dupe quant à leur caractère plausible. Essayons de quantifier l'écart qui sépare nos techniques de celles nécessaires pour réaliser de tels Titans.

Le jaeger : un poids lourd

Le principal jaeger du film, Gipsy Danger, a des dimensions impressionnantes. Il mesurerait 88 mètres de hauteur et pèserait 6 400 tonnes. Ces caractéristiques sont-elles cohérentes ? Si l'on considère qu'il est environ 50 fois plus haut qu'un humain, et qu'il en a grossièrement les proportions, il est 50 fois plus large, plus haut, plus profond, soit un volume $50 \times 50 \times 50$ fois plus important. Pour déterminer la masse du jaeger, il faut aussi connaître sa densité, qu'on imagine sans aucun doute plus élevée que celle d'un corps humain. Pour s'en faire une idée, rappelons que le robot humanoïde Asimo élaboré par la Société *Honda* et dont la première version date de 2000, mesure 1,3 mètre et pèse 54 kilogrammes, quasiment le double d'un jeune humain de cette taille. Ayant un volume voisin de celui d'un humain de sa taille, Asimo a donc une densité double. Mais la structure d'un jaeger devant être très résistante, et donc riche en métaux, une densité au moins trois fois supérieure à celle d'un humain paraît raisonnable.

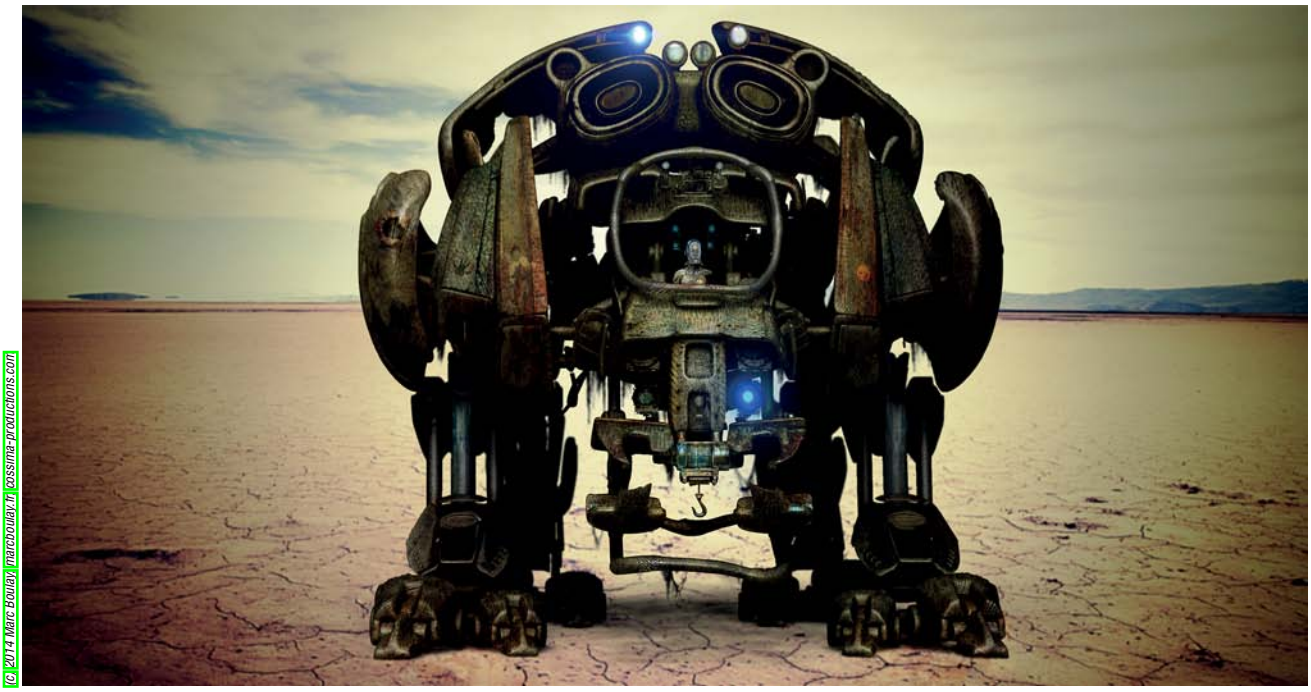
Warner Bros. France

1. LE FILM *PACIFIC RIM* **met en scène des robots géants, qui auraient bien des difficultés à se mouvoir dans la réalité !**

Ainsi, la masse de Gipsy Danger serait au moins égale à 26 000 tonnes. Par conséquent, la masse annoncée pour ce jaeger ne correspond pas à la hauteur, que l'on peut évaluer lors d'une scène de combat à Hong Kong : quand il passe près d'un immeuble, le sommet de la tête de Gipsy Danger atteint facilement le 25e étage. Les jaegers sont donc des monstres de métal, en comparaison desquels le plus gros robot marcheur du monde fait figure de nain : Tradinno est un robot-dragon de 15 mètres de long pesant 11 tonnes et dont les ailes font 12 mètres d'envergure. Il est visible au Drachenstich, une fête folklorique qui se tient chaque année dans le village de Furth im Wald, en Bavière. Bien que capable de cracher du feu, il ne ferait pas le poids face à un jaeger !

Avoir un robot géant ne suffit pas. Encore faut-il le conduire sur les lieux du combat. Compte tenu des dimensions d'un jaeger, la tâche n'est pas aisée. Au début du film, Gipsy Danger sort d'un hangar qui ressemble beaucoup au VAB *(Vehicle Assembly Building)*, le grand bâtiment (160 mètres de hauteur pour 218 mètres de longueur et

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014



© 2014 Marc Boulay (marcboulay.fr, cossima-productions.com)

2. CET EXOSQUELETTE de taille modeste est moins gourmand en énergie et donc plus réaliste que les robots géants de *Pacific Rim*. Dans un futur plus ou moins lointain, il pourrait servir à explorer les fonds marins, des milieux hostiles pour les humains ou avoir des applications militaires.

158 mètres de largeur) du Centre spatial Kennedy de la NASA où étaient assemblées les fusées *Saturn V* du programme *Apollo*. Le jaeger repose d'ailleurs sur un véhicule à chenilles qui ressemble à l'engin massif (2 700 tonnes !) utilisé pour le transport des lanceurs spatiaux américains jusqu'au pas de tir. Durant le combat qui a lieu à Hong Kong, la solution adoptée est différente : les jaegers sont transportés par voie aérienne, grâce à des hélicoptères porteurs. Plusieurs plans montrent huit hélicoptères emportant un jaeger, ce qui paraît un peu optimiste... Le plus gros hélicoptère de transport – le Mil Mi-26 russe – étant capable d'emporter 20 tonnes de charge utile, il faudrait... 320 hélicoptères si Gipsy Danger pèse les 6 400 tonnes annoncées, et 1 300 si notre estimation de sa masse est correcte !

Un géant handicapé

Le gigantisme du jaeger pose un curieux problème : le simple fait de soulever un de ses bras est un exploit. En se fondant sur les proportions d'un humain, dont le bras fait 40 pour cent de la hauteur, celui de Gipsy Danger doit mesurer environ 35 mètres. De plus, un bras humain pèse à peu près six pour cent de la masse du corps, ce qui donne au jaeger un bras pesant plus de 1 500 tonnes, plus du double de la masse d'un Airbus A380 à pleine charge. On comprend mieux que ses coups de poing soient dévastateurs.

Encore faut-il qu'il soit capable de mettre ce bras en mouvement. En effet, un calcul simple montre que le couple nécessaire pour simplement soulever ce bras est de l'ordre de 260 millions de newtons-mètres. On peut calculer que lever le bras de Gipsy Danger nécessiterait l'équivalent de 215 000 moteurs d'un bolide telle la Bugatti Veyron. Reste à espérer que si jamais la Terre est un jour attaquée par des monstres géants, nous aurons eu le temps d'inventer des moteurs capables de mettre ces robots en mouvement...

Quant à l'énergie nécessaire à mouvoir un jaeger, elle soulève une autre question. Dans le film, il est dit que Gipsy Danger dispose d'un réacteur nucléaire à « double cœur ». En la matière, la comparaison adéquate est à faire avec les réacteurs nucléaires maritimes utilisés sur les porte-avions, les sous-marins, les brise-glace ou certains navires marchands. L'avantage de la propulsion nucléaire est de ne pas nécessiter d'oxygène.

Ainsi, les sous-marins classiques sont contraints de remonter en surface après quelques dizaines d'heures de plongée pour alimenter leurs moteurs diesel en oxygène, ce qui leur permet de recharger leurs batteries électriques. Comme un sous-marin à propulsion nucléaire, Gipsy Danger peut donc se déplacer longuement sous l'eau, ce qui lui sera bien utile lorsqu'il interviendra pour détruire la brèche au fond de l'océan Pacifique, par laquelle sortent les kaijus. De plus, ces réacteurs sont beaucoup plus compacts que les réacteurs classiques, car ils fonctionnent avec un combustible plus enrichi en uranium 235 que le combustible d'une centrale classique (de 20 à plus de 96 pour cent, au lieu de 4 pour cent dans une centrale nucléaire). Selon la taille du navire, la puissance varie de 50 à près de 500 millions de watts. Est-ce suffisant pour alimenter Gipsy Danger ? Pour soulever un kaiju de 8 000 tonnes à 50 mètres de hauteur en une seconde, il doit disposer d'une puissance de près de quatre milliards de watts ! L'équivalent d'une petite dizaine de gros réacteurs nucléaires maritimes.

On l'aura compris, les robots géants de *Pacific Rim* ne sont guère raisonnables : ils sont trop grands, trop lourds, trop gourmands en énergie. On ne peut en faire le reproche à Guillermo del Toro qui, après tout, produit du divertissement sans prétention. L'intérêt de l'analyse scientifique de son film est ailleurs : comprendre que, grâce aux sciences, nous pouvons décoder le monde, fût-il imaginaire ! ■

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

Ils donneront une conférence au Palais de la Découverte, à Paris, le jeudi 22 mai 2014 à 14 heures.

Retrouvez les articles de J.-S. Steyer et R. Lehoucq sur www.pourlascience.fr

ART & SCIENCE

La jupe des derviches : et pourtant, elle tourne…

Jean-Léon Gérôme s'est attaché à rendre compte de la forme qu'adopte la jupe des derviches tourneurs lorsqu'ils dansent. Des physiciens ont récemment mis en évidence les forces qui façonnent la jupe en rotation. La scène représentée par le peintre est-elle compatible avec leur modélisation ?

Loïc MANGIN

En 1852, le peintre Jean-Léon Gérôme (1824-1904) est sollicité par Alfred Émilien, le Surintendant aux Beaux-Arts de l'empereur Napoléon III, pour une toile monumentale qui sera exposée lors de l'Exposition universelle de 1855. Le tableau, qui représente l'instauration de la *Pax Romana* par Auguste et la naissance du Christ, est aujourd'hui visible au Musée d'Amiens où il a été transféré en 1864.

Ce *Siècle d'Auguste et la naissance du Christ* reçut un accueil mitigé de la part de la critique, mais il rapporta au peintre une somme assez confortable (20 000 francs de l'époque) pour lui permettre de s'offrir une escapade en Orient, notamment à Constantinople, en Turquie, dès 1853. Il voyagea avec l'acteur français Edmond Got. Le peintre retourna en Turquie l'année suivante et, en 1856, gagna l'Égypte.

Ces séjours pendant lesquels il remplit de nombreux carnets de dessins, inspirèrent notablement Gérôme qui consacra de nombreuses toiles « orientalistes » à divers aspects de la religion musulmane, à des scènes de genre, ainsi qu'à des paysages nord-africains. Citons le *Bain turc*, le *Charmeur de serpents*, le *Marchand de tapis au Caire*…

Sur l'une de ces peintures, *Le Derviche tourneur* (1889), il représente un des membres de l'ordre Melveli, un ordre musulman soufi fondé à Konya (Turquie) au XIIIe siècle par Jalal al-Din Rumi. Cette confrérie se développa essentiellement dans l'Empire ottoman jusqu'en 1920 et s'étendit notamment aux Balkans, en Syrie et en Égypte. L'ordre fut déclaré hors-la-loi en Turquie en 1925, puis fut de nouveau légalisé en 1950.

Le terme « derviche » (*pauvre* ou *mendiant* en persan) désigne un individu qui suit la voie ascétique soufie, tandis que l'épithète *tourneur* renvoie à la danse rituelle de l'ordre, le samā' (ou sema). Lors de celle-ci, les disciples, les bras croisés, les mains sur les épaules, se mettent à tourner lentement, puis étendent les bras, la main droite tournée vers le ciel et la main gauche tournée vers la terre. Dans cette position, le derviche symbolise l'axe de l'Univers. Tout en tournant sur eux-mêmes, les danseurs tournent autour de la salle.

Deux premières danses sont effectuées en commun, puis sont suivies d'une troisième individuelle : c'est vraisemblablement celle que l'on distingue sur le tableau de Gérôme. Précisons que l'islam orthodoxe ne reconnaît pas cette pratique qui a été inscrite au patrimoine culturel immatériel de l'humanité par l'UNESCO en 2008.

La forme de la jupe n'apparaît dans les simulations qu'en tenant compte de la force de Coriolis, celle qui explique la formation des cyclones.

Pendant la rotation des danseurs, leurs jupes blanches tournent et dessinent un cône parcouru d'ondes du tissu. De ce point de vue, le tableau est-il réaliste ? Des éléments de réponse sont apportés par les travaux de Martin Michael Müller, de l'Université de Lorraine, à Metz, de Jemal Guven, de l'Université autonome de Mexico et de James Hanna, de l'Institut polytechnique de Virginie, aux États-Unis. Ils ont étudié la forme que prennent les jupes lors du mouvement giratoire des danseurs.

En mouvement (on trouve de nombreuses vidéos sur Internet), ce vêtement adopte une forme stable constituée de trois faces légèrement concaves (elles sont parfois quatre, voire plus) et séparées par des crêtes allant de la ceinture au bord de la jupe. Ces plis sont comme les arêtes d'une pyramide (le plus souvent un tétraèdre) dont le sommet coïncide avec le ventre du danseur. Les danseurs et donc les jupes font environ un tour par seconde, tandis que la forme pyramidale tourne à une fréquence inférieure.

Pour comprendre cette forme, les physiciens ont étudié un modèle simplifié où l'on néglige la gravité, la rigidité de la

Wmn pg Dervishes, c. 1889, (oil on canvas), Gérôme, Jean Léon (1824-1904) / Private Collection / The Bridgeman Art Library

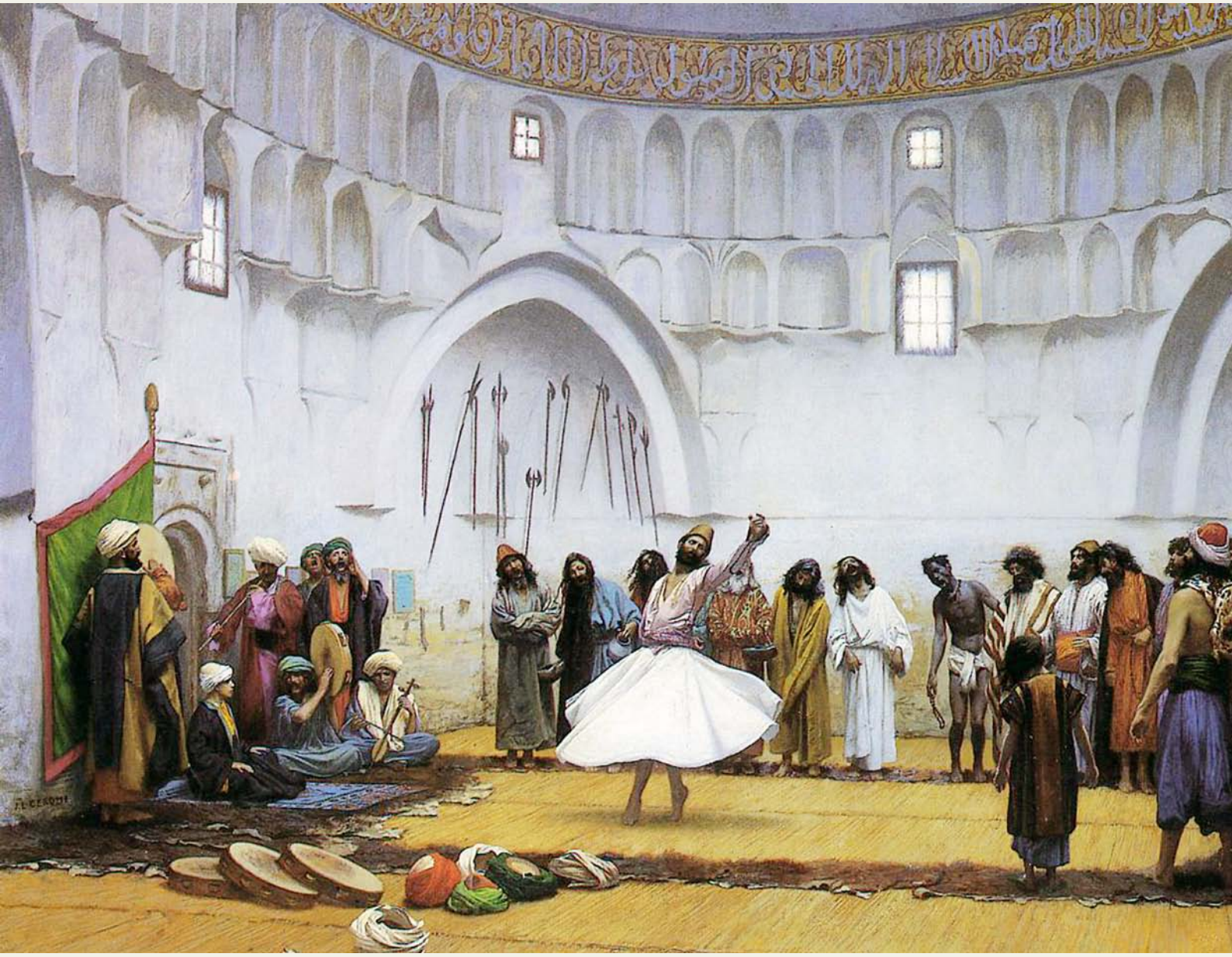
© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

matière de la jupe, son interaction avec l'air environnant… Ils ont alors découvert que cette forme n'apparaît dans leurs calculs que si l'on tient compte de la force de Coriolis, une force d'inertie subie par tout corps en mouvement dans un système en rotation. La force de Coriolis associée à la rotation de la Terre explique par exemple le sens de rotation de courants atmosphériques et océaniques de grande ampleur, tels les cyclones.

Elle intervient également dans la forme des jupes. De fait, quand cette force de Coriolis est supprimée du modèle des physiciens, la forme pyramidale s'évanouit !

Revenons au tableau de Gérôme. La jupe représentée est-elle conforme aux résultats des physiciens ? C'est difficile à dire, mais la forme pyramidale ne semble pas respectée. Toutefois, selon M. M. Müller, pour répondre avec précision, on aurait besoin d'informations sur les mouvements du danseur qui ont précédé l'« instantané » peint. Il est possible que le derviche n'ait pas tourné à une vitesse constante auparavant, ce qui expliquerait la perturbation observée du motif en tétraèdre. À la décharge du peintre, on imagine mal faire poser un derviche en pleine action ! ■

J. Guven *et al.*, **Whirling skirts and rotating cones**, *New Journal of Physics*, vol. 15, 113055, 2013.



© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

IDÉES DE PHYSIQUE

La recette d'une belle mousse de bière

L'utilisation d'azote sous pression permet d'obtenir une mousse plus fine et plus durable qu'avec du dioxyde de carbone.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Versée dans un verre à partir d'une tireuse ou d'une canette, la bière stout irlandaise Guinness produit une cascade de bulles descendantes et un col blanc bien crémeux, à la différence de la plupart des autres bières. Pourquoi ces particularités ?

Il faut d'abord savoir que la tireuse de la Guinness fonctionne à l'azote (N_2) plutôt qu'au dioxyde de carbone (CO_2). Comme on le verra, c'est crucial pour comprendre comment les bulles sont produites, pourquoi on les voit descendre le long du verre plutôt que remonter et comment il est possible d'obtenir avec une canette le même type de mousse qu'avec une tireuse à pression. Certains des mécanismes physiques en jeu n'ont d'ailleurs été compris que tout récemment.

LES AUTEURS

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

L'utilisation d'un mélange de gaz à forte teneur en azote plutôt que du dioxyde de carbone a plusieurs conséquences. Tout d'abord, contrairement au dioxyde de carbone, l'azote dissous dans l'eau n'est pas acide ; il en résulte une bière plus douce. Une autre propriété de la bière azotée est que sa mousse est formée de bulles très fines, d'où l'aspect crémeux.

Des bulles d'azote qui grossissent moins

Cette finesse des bulles est due à la faible solubilité de l'azote dans l'eau. Imaginons qu'une bulle se soit formée au sein de la bière. Qu'elle soit carbonée ou azotée, la bière a été préparée sous une pression de l'ordre de 1,5 ou 2 atmosphères de dioxyde de carbone ou d'azote. Au moment où la bulle se forme, la bière qui vient d'être tirée est à pression atmosphérique. Il en est donc de même de la bulle. Cette dernière monte dans un liquide sursaturé de gaz dissous. Une partie de ce gaz en excès pénètre dans la bulle et la fait grossir. Or la solubilité de l'azote étant 65 fois inférieure à celle du dioxyde de carbone, il y a moins de gaz dissous à relâcher. Dans la Guinness, une bulle grossit donc beaucoup moins que dans une autre bière.

Cette petite taille des bulles a une conséquence que les amateurs connaissent bien : lorsqu'on verse la Guinness, on remarque une cascade de bulles qui descendent le long des parois du verre, au lieu

1. LORSQU'ON OUVRE UNE CANETTE de bière de la marque Guinness *(à droite)*, le liquide est finement mousseux dès le début, contrairement à une bière classique. La canette de Guinness contient une capsule d'azote percé d'un minuscule trou, grâce à laquelle un grand nombre de fines bulles d'azote sont produites dès l'ouverture de la canette.

Dessin de Bruno Vacaro

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

de remonter comme on pourrait s'y attendre. Pour l'expliquer, des chercheurs de l'Université de Limerick, en Irlande, ont récemment proposé un scénario où la forme du verre joue un rôle crucial.

Commençons par analyser le mouvement d'une seule bulle. Sous l'effet de la poussée d'Archimède, la bulle commence à accélérer vers le haut, puis atteint rapidement une vitesse pour laquelle la force de traînée compense la poussée d'Archimède. Cette vitesse est de l'ordre de trois millimètres par seconde pour des bulles d'environ un dixième de millimètre de diamètre.

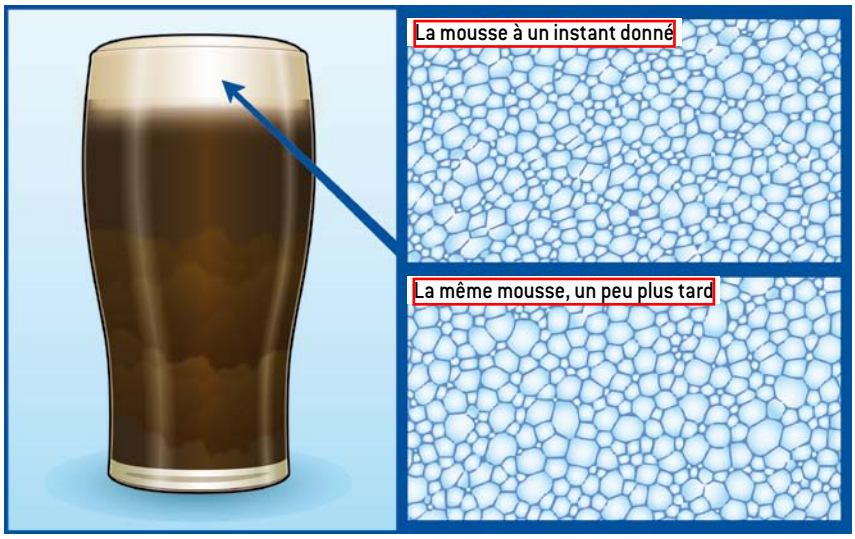
Une descente au lieu d'une montée

Pourquoi voit-on alors les bulles descendre le long de la paroi du verre ? Supposons que le verre soit évasé, comme il se doit. Lors du tirage, les bulles se forment dans tout le volume. Or comme leur ascension est verticale, il se crée une zone dépourvue de bulles au voisinage de la paroi évasée.

Vers le centre du verre, on a ainsi des bulles qui poussent le liquide vers le haut. Aux bords, en revanche, l'absence de bulles rend le fluide plus dense qu'au centre et, de plus, le prive d'un effet d'entraînement vers le haut. Cette dissymétrie crée une circulation : dans la région centrale, le liquide monte, tandis qu'au voisinage des parois, il descend.

La vitesse de descente est modérée, de l'ordre du centimètre par seconde, mais comme elle est supérieure à la vitesse d'ascension des quelques bulles proches des bords, donc visibles, on peut voir ces dernières couler. Les bulles des bières carbonées, plus grosses, montent bien plus vite et ne sont donc pas entraînées par le liquide qui descend : on ne les voit pas couler.

Avec un verre se fermant vers le haut, l'effet est inversé : les bulles montent plus rapidement que pour un verre cylindrique. Notons par ailleurs que les biologistes mettent à profit un effet analogue lorsque du sang est contenu dans une éprouvette. Connu sous le nom d'effet Boycott, il s'agit d'une accélération de la sédimentation des globules rouges, due à l'écoulement créé lorsque l'éprouvette est inclinée.



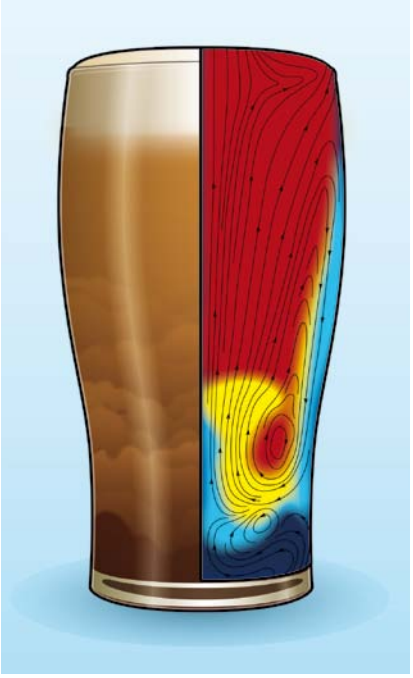
2. LA MOUSSE D'UNE BIÈRE AZOTÉE est composée de bulles de petite taille, ce qui est lié à la faible solubilité de l'azote dans l'eau. Cette faible solubilité explique aussi que la mousse est plus stable : elle « mûrit » plus lentement (les bulles grossissent et se raréfient moins vite).

Les petites bulles donnent une mousse qui apparaît très blanche, comme la neige, car la lumière est diffusée de multiples fois sur les interfaces gaz-liquide. Avec la Guinness, cette mousse persiste plus longtemps. Pourquoi ?

La pression du gaz régnant à l'intérieur d'une bulle dépend de la taille de cette dernière. En raison de la tension superficielle de l'interface gaz-liquide, cette pression est d'autant plus élevée que le rayon de la bulle est petit. Même en l'absence de perturbation qui ferait éclater les parois, les différences de pression entre bulles de tailles différentes conduisent au « mûrissement » de la mousse.

Là où la pression est forte, le gaz va davantage se dissoudre dans la paroi que là ou la pression est faible. Par ce mécanisme, le gaz traverse les parois pour aller des petites bulles vers les grosses bulles. Les petites bulles régressent plus que les plus grandes qui deviennent dominantes, la mousse s'éclaircit et se fragilise, car il y a de moins en moins de bulles.

Dans une bière à l'azote, la faible solubilité de ce gaz rend le mûrissement beaucoup plus lent qu'avec du dioxyde de carbone. Ainsi, au bout de cinq minutes, une bulle de dioxyde de carbone d'un demi-millimètre disparaît presque entièrement, alors qu'une bulle d'azote de même taille se dégonfle à peine.



3. PRÈS DES PAROIS ÉVASÉES, le liquide est appauvri en bulles, car celles-ci montent verticalement. Le liquide de cette zone est alors plus dense qu'au centre et plonge donc vers le bas, entraînant avec lui quelques bulles, d'où la cascade de bulles qui apparaît à proximité des parois du verre. Dans le schéma de circulation du fluide dans le verre, les couleurs traduisent la concentration en bulles *(croissante du bleu foncé au rouge foncé)*.

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

Il y a cependant un prix à payer pour profiter des avantages de l'azote : la mousse se forme plus difficilement. Pour une bière carbonée, le tirage sous pression ou le versement depuis une canette créent assez de turbulences pour que le dioxyde de carbone dissous se libère et crée une mousse compacte de plusieurs centimètres dans le verre. Avec l'azote, cela ne suffit pas.

Pour tirer la bière azotée en fût, on la propulse avec un mélange de trois quarts d'azote et d'un quart de dioxyde de carbone à une pression d'environ deux bars. On la verse alors à travers un robinet fermé par un disque percé. Le flux de bière devient turbulent, ce qui brasse le gaz et le liquide pour former une fine mousse.

Que se passe-t-il pour une canette ? Comme l'azote est peu soluble, sa plus grande part resterait gazeuse et surnagerait au-dessus du liquide. Une fois la canette ouverte, le gaz s'échapperait directement dans l'air.

La marque Guinness a donc breveté en 1969 un dispositif original. Juste avant de sceller la canette, on y introduit une capsule sphérique en plastique percée d'un minuscule orifice, et un peu d'azote liquide. Ce dernier s'évapore et met tout l'intérieur de la canette sous pression. Au cours de ce processus, le gaz s'introduit dans la capsule avec un peu de bière et y reste piégé.

Lorsqu'on ouvre la canette, la dépressurisation est brutale : le gaz contenu dans la capsule se dilate, s'échappe à travers l'orifice et propulse la bière qu'elle renferme. La forte agitation qui en résulte dans le liquide ambiant produit alors les bulles tant désirées. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. S. Benilov *et al.*, **Why do bubbles in Guinness sink ?**, *American Journal of Physics*, vol. 81, pp. 88-91, 2013.

W. T. Lee *et al.*, **Bubble nucleation in stout beers**, *Physical Review E*, vol. 83, article 051609, 2011.

M. Robinson *et al.*, **Waves in Guinness**, *Physics of Fluids*, vol. 20, article 067101, 2008.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur
www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

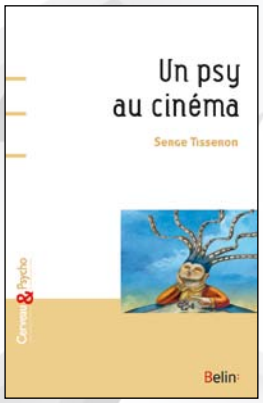
La librairie POUR LA SCIENCE

Le savoir scientifique au fil des pages

Un psy au cinéma

Serge Tisseron

Réf. 84245127



Le cinéma fascine. Il surprend, il amuse, il nous permet de nous évader, il émeut. Chacun a son avis sur les fims qu'il voit. Mais si le cinéma nous parlait d'abord de nous ? De ce que nous sommes, de nos peurs avouées ou non, de nos bassesses et de nos grandeurs ? Il s'agirait moins alors de le comprendre que de nous comprendre à travers lui, individuellement, mais aussi collectivement.

Éditions Belin 2013
280 pages – 25 euros – ISBN 978-2-84245-127-1

Le cerveau mélomane

Emmanuel Bigand (dir.)

Réf. 84245118

La musique touche tout un chacun et suscite de multiples émotions. Elle ne laisse personne indifférent. Ce que l'on sait moins, c'est la puissance de la musique. Puissance sur les capacités cognitives et intellectuelles de ceux qui en écoutent souvent ou qui la pratiquent ; mais aussi puissance thérapeutique chez certains sujets.

Éditions Belin 2013
200 pages – 21 euros – ISBN 978-2-84245-118-9

Les sens trompés

Des anomalies du cerveau aux comportements étranges

Patrick Verstichel

Réf. 84245111

Cet ouvrage est un recueil des articles que le neurologue Patrick Verstichel a publiés dans le magazine *Cerveau & Psycho*. L'auteur, médecin clinicien, nous propose des « enquêtes médicales » sur des cas cliniques parfois difficiles à élucider !

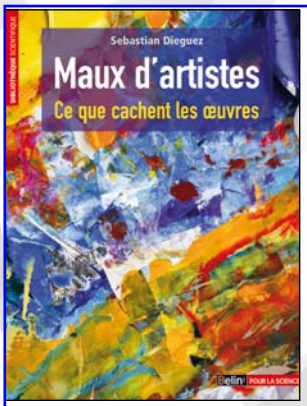
Éditions Belin-Pour la Science 2013
160 pages – 25 euros
ISBN 978-2-8424-5111-0

Maux d'artistes

Ce que cachent les œuvres

Sebastian Dieguez

Réf. 84245101



Existe-t-il des liens cachés entre une œuvre d'art – une peinture, une sculpture, une composition musicale ou une œuvre littéraire – et une maladie de l'esprit que présentait son auteur ? Examinant divers chefs-d'œuvre avec un regard de neuropsychologue, Sebastian Dieguez analyse plus d'une vingtaine d'œuvres de Dostoïevski, Monet, De Chirico, Proust, Van Gogh, etc.

Éditions Belin / Pour la Science 2010
176 pages – 25,40 euros – ISBN 978-2-8424-5101-1

Pour commander ces ouvrages, notez leur référence et rendez-vous page 99

OFFRE DÉCOUVERTE

POUR LA SCIENCE

Pour la Science (12 nos)

1 an ■ 56 € seulement ! au lieu de ~~74,90 €~~

Vos avantages abonné

- ✔ 25 % d'économie
- ✔ la garantie de ne manquer aucun numéro
- ✔ l'accès gratuit aux versions numériques sur www.pourlascience.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science • Service Abonnements • Libre réponse 90 382 • 75 281 Paris cedex 06

Oui, je m'abonne au magazine *Pour la Science* :

❑ **1 an • 12 numéros • 56 €** au lieu de ~~74,90 €~~ **+ de 25 % de réduction !**

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

❑ **2 ans • 24 numéros • 106 €** au lieu de ~~149,80 €~~ **+ de 29 % de réduction !**

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 25 € – autres pays 51 €.

Pour 20 € de plus, découvrez *Dossier Pour la Science* tous les trimestres !

Je préfère m'abonner à *Pour la Science* (12 nos/an) + *Dossier Pour la Science* (4 nos/an)

❑ **1 an • 16 numéros • 76 €** au lieu de ~~102,70 €~~

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

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

_____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

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

❑ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscules)

_____@_____

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. **Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ❑.**

Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30.04.2014

PLS438

SCIENCE & GASTRONOMIE

Des insectes à cuisiner

La chitine de la carapace des insectes promet des décoctions nouvelles. À quand des bisques de scarabées ?

Hervé THIS

Pour remplacer les protéines animales, les milieux agronomiques envisagent la consommation d'insectes, que l'on apprend à élever. Reste la question culinaire : dans quelles préparations les intégrera-t-on ? Les fera-t-on simplement griller, ou rôtir ? Pour des larves, passe encore, mais pour des insectes parvenus au stade adulte, la carapace est une structure coriace, qui risque de nous rester entre les dents. Doit-on la jeter ? L'analyse chimique de cette matière conduit à penser que la confection de bisques est envisageable.

Les bisques sont un fleuron de la cuisine traditionnelle française. On les obtient en chauffant fortement des carapaces de crustacés dans un peu d'huile, jusqu'à l'apparition d'un léger brunissement ; puis on ajoute de l'eau, des légumes (oignons, tomates, vert de poireau), des aromates (persil, par exemple), quelques condiments (une feuille de laurier) et l'on cuit très doucement, à couvert ; enfin on filtre et l'on clarifie éventuellement, à l'aide d'un blanc d'œuf battu en neige que l'on chauffe avec le liquide, avant de passer à travers un linge propre plié en quatre.

Descendons au niveau moléculaire, pour analyser à la lumière des transformations chimiques ces gestes séculaires.

Dans le cas des bisques, la première opération est scolastiquement nommée « pyrolyse », parce que l'on ignore presque tout des transformations chimiques qu'elle engendre. On sait que se forme l'omniprésent 5-hydroxyméthylfurfural ; mais l'huile présente ajoute son lot de complications, ce qui engendre alcanes, alcènes, cétones, esters, acides carboxyliques, produits cycliques, parmi lesquels des lactones, des dioxanes et des dioxolanes substitués : un imposant cortège que l'on peine encore à caractériser. Puis, dans la deuxième étape, on extrait dans l'eau les composés ainsi formés, eau qui s'enrichit simultanément de sucres et d'acides aminés, libérés par les tissus végétaux.

La raison pour laquelle on utilise ainsi les carapaces de crustacés est leur composition chimique : en première approximation, les carapaces sont faites de carbonate de calcium, inerte dans les conditions de l'expérience (bien que la calcination des carbonates puisse produire de la chaux vive !), et de chitines ou de chitosanes, des composés « polysaccharidiques », faits par enchaînement de résidus de glucose liés à un atome d'azote, lequel est lié à deux atomes d'hydrogène ou à un groupe acétyle.

La présence de ces atomes d'azote est une clé du goût remarquable des bisques, comme le prouve l'expérience qui consiste à chauffer de la simple fécule, faite seulement de résidus de glucose : sans l'atome d'azote, on obtient une « fécule torréfiée » intéressante, certes, mais bien moins caractéristique que chitines et chitosanes chauffés.

La description chimique serait incomplète sans mention de la matière organique, la « chair », qui adhère aux carapaces, notamment dans les têtes : les protéines présentes apportent leur lot de composés odorants et sapides, comme le savent bien tous les amateurs de viande grillée. Là encore, les atomes d'azote, caractéristiques des résidus d'acides aminés dont l'enchaînement forme les protéines, sont libérés dans de petites molécules organiques puissamment odorantes, en compagnie de composés de Maillard, dus à la réaction avec des sucres simples, tel le glucose.

Si la plupart des tissus animaux contiennent des protéines, les chitines et chitosanes sont propres à quelques groupes d'organismes vivants : les céphalopodes (la plume des calmars, par exemple), mais aussi les crustacés... et plus généralement les arthrophodes, groupe auquel appartiennent les insectes. D'où la proposition de bien valoriser les carapaces.

Pour autant, si la question culinaire est simple, la consommation d'insectes dans l'Union européenne était négligeable avant le 15 mai 1997, date d'entrée en vigueur d'une réglementation sur les « nouveaux aliments ». C'est pourquoi les protéines d'insectes en font partie, et elles sont donc assujetties à des études d'innocuité importantes. Pour les insectes complets et les préparations à base d'insectes complets, la réglementation n'est pas encore clairement établie. ■

Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez les articles de H. This sur www.pourlascience.fr

MATHÉMATIQUES

17 équations qui ont changé le monde

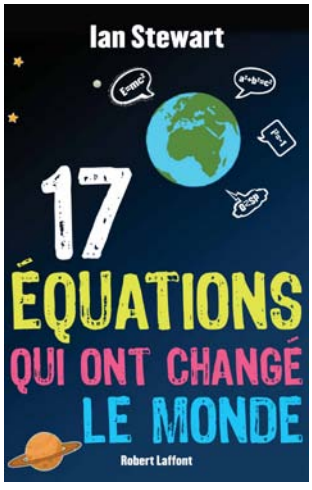
Ian Stewart
Robert Laffont, 2014
(416 pages, 22 euros).

En vulgarisation scientifique, il est de bon ton d'éviter les équations dont les lecteurs auraient peur, peur de ne pas comprendre des notations, peur de ne pas saisir leur signification, peur de mal les appliquer ou encore peur de ne pas savoir les résoudre. Ian Stewart a décidé de prendre le contrepied et d'expliquer les 17 équations qui, à son avis, ont « changé le monde ». Le terme est discutable, mais il est certain que ces équations ont modifié à jamais notre vision du monde.

Au fil des pages, une similitude apparaît : les grands développements symbolisés par les équations telles que celles de la transformée de Fourier, des ondelettes, de la théorie de l'information, de la distribution normale, et même l'équation de Schrödinger, sont nées de considérations pratiques. Ainsi, la transformée de Fourier est issue du problème de propagation de la chaleur dans une barre de fer, les ondelettes ont été conçues pour décrire des données irrégulières, la théorie de l'information a été élaborée pour améliorer l'efficacité des calculs, la distribution normale est née de la volonté d'analyser des données, démographiques ou autres.

Il n'est pas jusqu'à la mécanique quantique qui n'ait commencé avec des ampoules électriques dont Max Planck voulait optimiser l'efficacité. Planck rattacha le problème au rayonnement du corps noir et à la difficulté rencontrée à l'époque pour expliquer son spectre, ce qui le conduisit à une avancée révolutionnaire, l'hypothèse des quanta.

Le passage le plus actuel et peut-être le plus digne de réflexion est l'étude, à propos de la distribution normale des données, de la distinction entre une cause agissant sur les résultats des mesures et les fluctuations dites naturelles qui résultent du hasard de l'échantillonnage. Les questions sur cette nécessaire et difficile distinction abondent : les fluctuations actuelles du climat sont-elles aléatoires ou dues à l'action de l'homme, la diminution ou l'augmentation des délits résultent-elles d'une modification des actions de police, les résultats d'un nouveau système éducatif témoignent-ils d'une meilleure, ou moins bonne, efficacité de l'instruction ? Ces problèmes ont été posés dès les débuts des statistiques et restent l'objet de débats : nombre de questions restent non résolues, même par les mathématiques, mais sans les mathématiques on ne saurait même pas les poser !



Ce qui impressionne chez I. Stewart, c'est la clarté de ses exposés : encore et encore il nous montre que les mathématiques sont des idées avant d'être des calculs, et que ces idées, traduites par des équations motivées par une petite question, irriguent notre pensée.

Philippe Boulanger

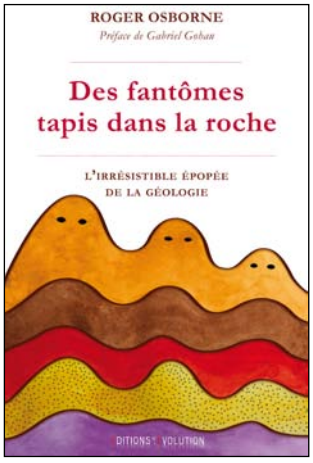
HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE

Des fantômes tapis dans la roche

Roger Osborne
Éditions de l'Évolution, 2013
(390 pages, 24 euros).

Vue de France, l'histoire des origines de la géologie peut apparaître comme une suite de coups de génie, dus à de grands savants occupant de hautes positions académiques : Buffon comprenant que la Terre est beaucoup plus ancienne qu'on ne le croyait, Cuvier mettant en évidence l'extinction des espèces, et ainsi de suite. Dans ce livre remarquable à plus d'un titre, Roger Osborne nous fait découvrir un aspect bien différent des premiers pas de la géologie, en nous emmenant dans une partie de l'Angleterre, le comté du Yorkshire, où une série de personnages, entre le Moyen Âge et le siècle dernier, ont fait progresser la science d'une façon souvent peu académique, mais avec des résultats déterminants.

La période cruciale est celle des dernières décennies du XVIII[e] siècle et des premières du XIX[e], lorsque la Révolution industrielle bouleverse l'économie anglaise et conduit à s'intéresser plus que jamais au sous-sol et à ses ressources. C'est l'occasion de découvrir une galerie de chercheurs hauts en couleur, dont le dénominateur commun est de ne pas appartenir au monde académique – l'exception principale étant William Buckland, professeur à Oxford et célèbre pour ses excentricités, qui va trouver dans les hyènes fossiles d'une caverne du Yorkshire des arguments en faveur des effets géologiques du Déluge. Les autres sont plus prosaïquement des militaires à la retraite, des industriels, des topographes – tel William Smith, que l'on nommera le « père de la géologie anglaise » pour avoir établi les principes de la stratigraphie et réalisé les premières cartes géologiques de type moderne, mais qui connut pendant la plus grande partie de sa vie de graves difficultés financières.



Sous la plume de R. Osborne, ces pionniers discrets prennent vie, allant de découverte en découverte, qu'il s'agisse des squelettes fossiles de grands reptiles marins ou d'une des premières observations dûment enregistrées d'une chute de météorite. À travers une suite d'épisodes qui ne manquent pas de pittoresque, l'auteur retrace la naissance d'une science avec beaucoup de talent, n'hésitant pas à introduire à l'occasion quelques personnages fictifs dans un récit qui n'est pourtant pas un roman, car il s'appuie avec rigueur sur une impressionnante masse de documents. Ce livre très original dans sa conception montre brillamment que l'histoire des sciences n'est pas une discipline aride. Derrière les découvertes et les hypothèses, il nous révèle des hommes de chair et de sang, dont la curiosité intellectuelle a contribué à transformer notre vision de l'histoire de la Terre.

Eric Buffetaut
CNRS, Laboratoire de géologie de l'ENS, Paris

© Pour la Science - n° 438 - Avril 2014

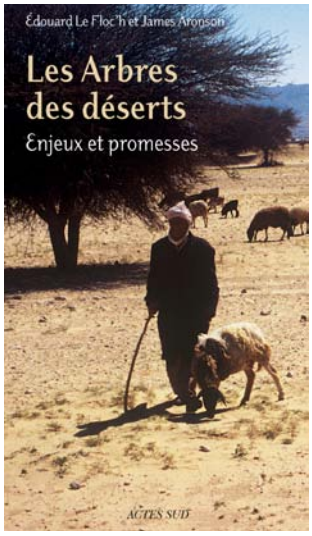
→ ÉCOLOGIE

Les arbres des déserts

Édouard Le Floc'h et James Aronson
Actes Sud, 2013
(384 pages, 30 euros).

Cet ouvrage proposé par deux scientifiques de renom, qui ont consacré leur carrière à l'étude de l'écologie des milieux arides et à leur restauration, apporte un nouveau regard sur les déserts, leur genèse, leur rôle dans le fonctionnement de la planète, leur importance socioculturelle pour les populations qui y vivent et la nécessité de les protéger, de les conserver ou de les restaurer. En prenant comme référence l'arbre et ses fonctions dans l'évolution spatio-temporelle de ces écosystèmes arides, les auteurs présentent de façon élégante et avec humilité les richesses naturelles des déserts et de leurs marges, patrimoine ignoré et souffrant trop souvent d'idées fausses.

Le documentaire *Désert vivant* (Walt Disney, 1953) a montré que ces zones arides hébergent de nombreux organismes végétaux et animaux, remarquables par l'ingéniosité qu'ils ont développée pour s'adapter et se multiplier dans ces conditions hostiles. Le dattier du désert *(Balanites aegyptiaca)*, par exemple, présente des épines au lieu de feuilles et un système racinaire double qui lui permet à la fois de capter l'eau des pluies sur une vaste étendue et d'atteindre les réserves profondes.



Ce livre a pour ambition d'informer et de convaincre les générations futures, *via* un dialogue habilement construit entre une jeune interlocutrice curieuse et imaginative et les auteurs sur ce que sont ces territoires. Illustré de nombreux documents d'archives et de figures savamment choisies, il regorge d'informations sur les stratégies mises en œuvre par les espèces d'arbres recensées dans les déserts pour s'adapter aux conditions environnementales drastiques qui les caractérisent et sur les usages traditionnels de ces ressources naturelles par les populations locales (le dattier du désert, par exemple, est très recherché pour la qualité alimentaire de ses fruits, les vertus médicinales de ses feuilles, la production de fibres, de savon, d'encre, de teintures pour les étoffes, etc.). Il souligne aussi leurs mésusages, qui aboutissent à une dégradation de ce patrimoine naturel et culturel.

L'ouvrage se termine par un fort message d'espoir. Les auteurs envisagent avec confiance la conservation et la restauration du capital naturel de ces zones arides en faisant le point sur les différents programmes et conventions de conservation en cours d'élaboration et sur les débuts d'application de programmes internationaux de restauration écologique à grande échelle tels que l'initiative africaine de la Grande muraille verte. Enfin, cet ouvrage représente un formidable témoignage de deux chercheurs passionnés, convaincus qu'il est possible d'agir pour contrecarrer l'évolution à laquelle ces régions sont confrontées.

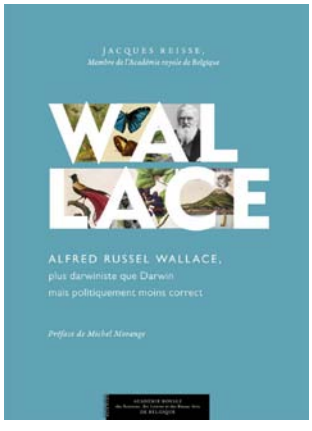
→ Robin Duponnois
IRD, Montpellier

→ HISTOIRE DES SCIENCES

Wallace

Jacques Reisse
Éditions de l'Académie royale de Belgique, 2013
(224 pages, 12 euros).

En science de la nature, déduction et induction sont indissociables : après la quantification des phénomènes, puis la recherche de lois qui synthétisent les données, deux champs où la rationalité la plus stricte s'impose, vient la recherche des mécanismes des phénomènes, qui se fonde sur

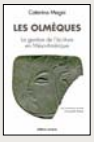


les lois dégagées, mais ne peut s'y résumer ; cette étape où l'imagination est reine est suivie par les essais de réfutation des mécanismes proposés. L'induction ? C'est la vie qui vient déranger la mortifère déduction, comme le disait Friedrich Nietzsche, mais c'est aussi la possibilité de divaguer, que la réfutation vient ensuite éviter.

Parfois, la nécessité d'introduire de l'originalité dans un travail est la cause de ce que, après coup, on considère comme une fantaisie déplacée : Isaac Newton ne s'est-il

Brèves

Les Olmèques



Caterina Magni
Errance, 2014
(367 pages, 49 euros).

Ce précis est l'œuvre d'une spécialiste de l'Université Paris-Sorbonne de cette civilisation méso-américaine d'il y a quelque 2500 ans. Il porte surtout sur la genèse de l'écriture olmèque. L'auteure fait le point sur les glyphes et sur leurs significations, puis analyse la façon dont ils sont adaptés sur les stèles et utilisés dans des représentations. À la fin du livre, un dictionnaire de ces motifs et symboles complète cette initiation à ce qui pourrait avoir été un système d'écriture, bien que la question reste controversée.

Les pièges de l'identité culturelle

Régis Meyran et Valéry Rasplus
Berg, 2014
(192 pages, 16 euros).

Le racisme biologique a régressé. Le racisme culturel l'a-t-il remplacé ? C'est la question que se posent les auteurs de ce livre et, pour y répondre, ils commencent par retracer la notion anthropologique de culture depuis la *Kultur* allemande jusqu'à la *culture* américaine. Puis ils se demandent comment cette notion d'origine anthropologique est passée dans le monde politique français. Conclusion : fonder la nation sur la race est illusoire ; le faire sur une chimérique « identité culturelle », c'est du pareil au même !

Les nouvelles armes de l'empire américain

Nick Turse
La Découverte, 2014
(152 pages, 12 euros).

Prix Nobel de la paix en 2009 pour ses efforts en faveur de la « coopération entre les peuples », Barack Obama contribue-t-il à la paix dans le monde ? Pas pour l'auteur de cet ouvrage, rédacteur en chef du site TomDispatch.com et spécialiste américain du complexe militaro-industriel de son pays. Il nous présente ici sa vision de la nouvelle doctrine militaire américaine à base de drones, de « soldats civils », de troupes supplétives, d'opérations spéciales et de cyberguerre. Une doctrine qui veut tirer profit des dernières avancées technologiques.

Brèves

L'anthropologie et le défi cognitif

Maurice Bloch
Odile Jacob, 2013
(270 pages, 29,90 euros).

L'inné est la grande peur des sciences sociales. Pour autant, il est bien évident que la biologie, par l'intermédiaire des neurosciences, et les sciences sociales sont en train de faire leur jonction, la première par le bas, les secondes par le haut. Cette guerre de la nature et de la culture, ce livre contribue à l'apaiser pour la remplacer par un dialogue dont tous les aspects (Qu'est-ce que le soi ? Le temps ?, etc.) sont admirablement abordés par l'auteur.

Neurocomix

Matteo Farinella et Hana Roš
Dunod, 2014
(144 pages, 14,90 euros).

Vous vous demandez comment fonctionne le cerveau et vous aimez les romans graphiques ? Ce livre est pour vous. Au fil d'un périple onirique au cœur de la forêt de neurones qui constitue le cortex cérébral, les auteurs, neurobiologistes, mêlent habilement explications et histoire des sciences à un récit imagé qui regorge d'inventivité. Peu à peu, au détour de rencontres insolites, neurotransmetteurs, transmission synaptique, influx nerveux, synchronisation des neurones, plasticité neuronale deviennent familiers et amènent avec finesse vers la grande question des neurosciences : qu'est-ce que l'esprit ?

Meat Atlas

Les Amis de la Terre
Fondation Heinrich Böll, 2014
(66 pages, gratuit).

Téléchargeable sur http://www.foeeurope.org, cet atlas de la viande, édité chaque année par la direction européenne de l'organisation non gouvernementale *Les Amis de la Terre* et rédigé en anglais, rassemble d'intéressants chiffres sur la production mondiale de viande. La faible biodiversité liée à l'énormité du cheptel, ou encore l'énorme consommation d'eau du bétail suscitent des questions : n'y a-t-il pas une exagération dans ce goût pour la viande que nous avons gardé de nos lointains ancêtres chasseurs-cueilleurs ?

pas piqué d'alchimie ? Alfred Wallace, lui, un de ces êtres passionnés par les mécanismes du monde, était aussi étrange pour son époque qu'il l'est à présent : en son temps, il était socialiste, antimilitariste, féministe ; aujourd'hui, son intérêt pour les fantômes et le surnaturel intrigue. Les petits esprits récuseraient le savant, mais Jacques Reisse, chimiste organicien, a l'ouverture d'esprit pour admirer une œuvre vraiment extraordinaire.

En collaboration avec Dominique Lambert, il a déjà publié un livre intitulé *Charles Darwin et Georges Lemaître*. De Darwin à Wallace, il n'y avait qu'un pas, puisque tous deux introduisirent la théorie moderne de l'évolution. Pourquoi une biographie de plus sur Wallace ? Non seulement le naturaliste eut une vie passionnante, importante pour les progrès de la science, mais il y avait aussi une œuvre à produire en collant à ses écrits (cités ici en anglais).

Autodidacte, Wallace eut le courage de sillonner le monde, pour des voyages parallèles à celui, célèbre, de Darwin. À l'époque, il fallait être aventureux, car on était loin des confortables voyages transatlantiques (Wallace perdit toute une collection naturaliste dans un naufrage). Son intelligence semble avoir été exceptionnelle, si l'on en juge par la diversité des thèmes abordés et par la qualité de ses analyses sociologiques, ethnologiques, économiques ou politiques.

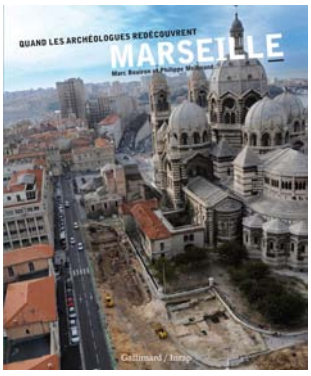
La biographie est suivie d'une longue analyse des relations de Darwin et de Wallace, puis de l'examen des idées de Wallace à propos de l'évolution de l'espèce humaine, des errances spiritualistes, de l'engagement politique… Tout cela fait de Wallace une personnalité attachante, que l'on est heureux de découvrir ou de redécouvrir.

→ Hervé This

→ ARCHÉOLOGIE

Quand les archéologues redécouvrent Marseille

Marc Bouiron, Philippe Mellinand *et al.*
Gallimard/Inrap, 2013
(176 pages, 25 euros)



Textes, images, présentation, tout dans ce livre suscite intérêt et admiration. Le texte nous conduit de la Préhistoire à la cité moderne. Il s'appuie sur une douzaine de cartes très claires qui non seulement localisent les fouilles et les monuments, mais aussi dessinent les fortifications, détaillent les activités portuaires, délimitent les quartiers des artisans, localisent les lieux de culte, plus tard l'emprise des hommes de pouvoir, militaire ou religieux.

Trente notices illustrent les monuments et les vestiges qui ont permis la reconstruction de cette évolution. De la grotte Cosquer au dernier Jeu de Paume de la cité phocéenne, en passant par une fonderie de canons et une salpêtrière, l'archéologie et les sciences naturelles reconstituent les aspects les plus inattendus de la vie quotidienne. L'analyse des variations du niveau marin explique l'enchevêtrement et l'ampleur des dépôts sur les rives du vieux Port. Ici ou là, des amas de coquillages révèlent les préférences gastronomiques des habitants. La découverte d'une vannerie intacte du VI[e] siècle avant notre ère laisse espérer la mise au jour de traces concrètes des premiers temps de la colonisation grecque.

L'extraction du sel, les épaves, les docks, les amphores par centaines, racontent le commerce du vin et du garum – une sauce à base de poisson dont raffolaient les Romains –, et évoquent autant d'activités liées à la mer. Le contrôle des échanges est illustré par un aperçu bref, mais précis, de la production monétaire de la cité. L'analyse des remparts successifs montre le souci de se prémunir contre les attaques terrestres. La reconstitution du théâtre romain ou du baptistère évoquent les manifestations collectives. Un four à céramique du XIII[e] siècle indique une influence arabe. Et les témoignages de la vie quotidienne sont encore nombreux.

Des clichés aériens montrent l'ampleur des sauvetages réalisés pendant les dernières décennies. De nombreuses aquarelles ou des relevés en trois dimensions restituent monuments et ateliers d'artisans.

[Marseille] « Seule ville de France à pouvoir revendiquer 26 siècles d'histoire urbaine continue », lit-on sur la première page, mais Bourges la talonne déjà, et Bordeaux va sans doute suivre : espérons qu'elles susciteront elles aussi des publications de cette qualité.

→ Olivier Buchsenschutz
AOROC, ENS, Paris

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur
www.pourlascience.fr

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Avril 2014 – N° d'édition 077438-01 – Commission paritaire n° 0917 K 82079 – Distribution : NMPP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/188 264 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

Avec plus d'1 million de Sociétaires, on peut déplacer des montagnes

Quand une banque tire sa force de l'esprit coopératif, elle s'appuie sur des valeurs de solidarité, d'écoute et de confiance. *Créée par des enseignants, la CASDEN s'engage ainsi auprès de plus d'un million de Sociétaires à réinvestir leur épargne dans le financement des projets de chacun.*

Rejoignez-nous sur **casden.fr** ou contactez-nous au **0826 824 400***

*Accueil téléphonique ouvert de 8h30 à 18h30 du lundi au vendredi (0,15€ TTC/min en France métropolitaine)

BANQUE POPULAIRE

L'offre CASDEN est disponible en Délégations Départementales et également dans le Réseau Banque Populaire.

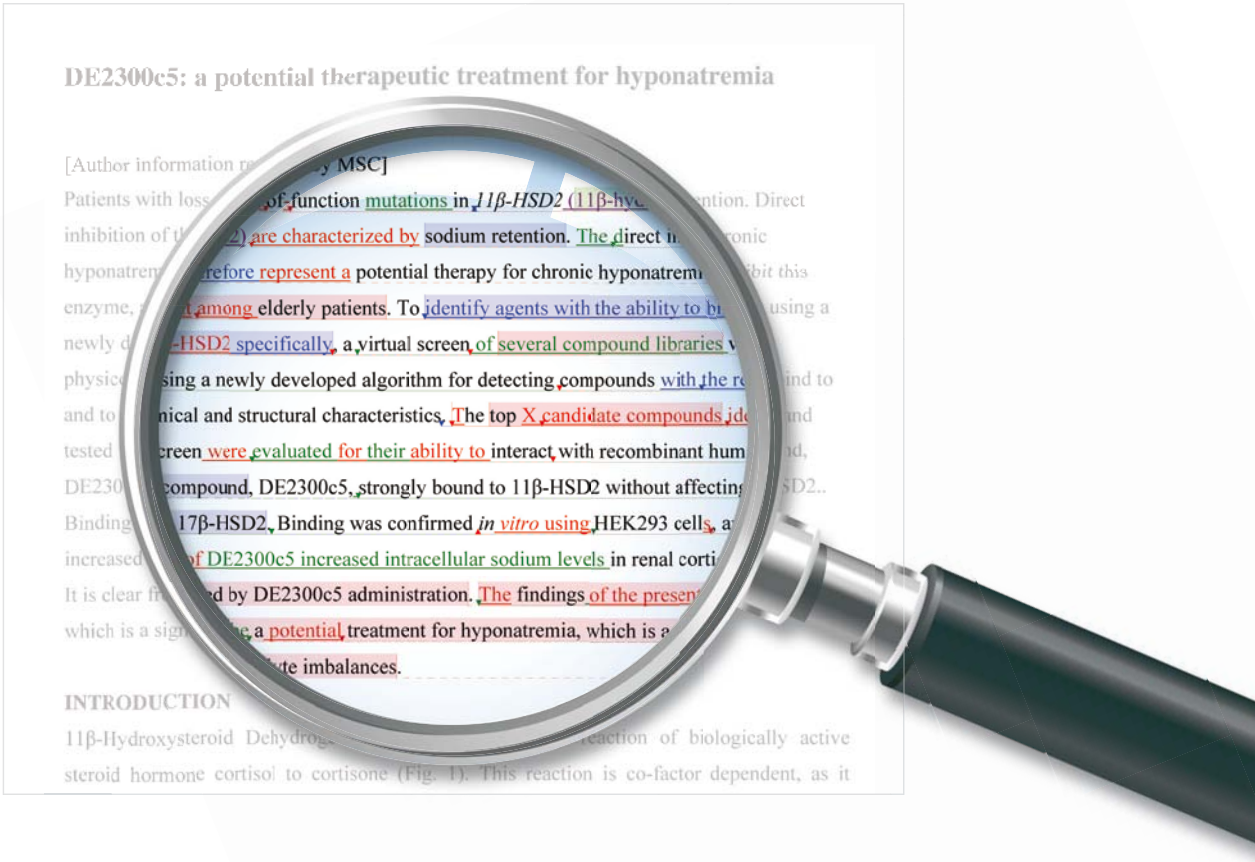
casden
BANQUE POPULAIRE

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture

CASDEN Banque Populaire | Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable | Siège social : 91 Cours des Roches | 77186 Noisiel | Siret n° 784 275 778 00842 | RCS Meaux | Immatriculation ORIAS n° 07 027 138 | BPCE - Société anonyme à directoire et conseil de surveillance au capital de 467 226 360 € | Siège social : 50 avenue Pierre Mendès France | 75201 Paris Cedex 13 | RCS PARIS n° 493 455 042 | Immatriculation ORIAS n° 08 045 100
BROCA & WERNICKE | Illustration : Kilo Offer

MACMILLAN
SCIENCE COMMUNICATION

Scientific **Editing**



Services d'édition aux standards de *Nature* et de conseil pour manuscrits scientifiques

Les éditeurs de **MSC Scientific Editing** savent aller à l'essentiel et comprendre n'importe quel texte scientifique, que ce soit un article rédigé pour le soumettre à un journal, une demande de bourse ou tout autre document technique. Le processus d'édition est réalisé avec une connaissance approfondie des besoins d'une publication scientifique dans un journal à facteur d'impact élevé.

Ces services incluent de nombreuses améliorations détaillées, des commentaires précis et un rapport écrit contenant:

- Des commentaires constructifs et des conseils utiles sur la façon de présenter au mieux vos recherches
- Une étude des principaux points à revoir
- Des recommandations sur le journal le mieux adapté à l'article que vous souhaitez publier (si nécessaire)

Vous pouvez bénéficier d'une réduction de 10% sur votre premier projet d'édition en entrant le code **SE_ADF14** au cours du chargement de votre article ou avec votre email.

Nos éditeurs savent ce qu'il faut faire pour publier dans les meilleurs journaux.
Confiez-leur vos manuscrits dès aujourd'hui!

msc.macmillan.com

*Nature Publishing Group editorial and publishing decisions are independent of MSC services.