

CANCER DE LA PROSTATE : dépister... mais avec discernement !

■ POUR LA SCIENCE

Juin 2012 n° 416

Édition française de Scientific American

L'Univers quantique

Comment détecter
les grains d'espace-temps ?

Cinéma et télé 3D

Voir en relief avec
ou sans lunettes

Elfes, sylphes et jets bleus

Des couleurs au-dessus
des nuages orageux

La traite des esclaves

Un facteur d'urbanisation en Afrique

M 0267 46 F 620 €



Solidarité

Engagement

Proximité

Confiance



casden



BANQUE POPULAIRE

Humaine et contemporaine
notre identité reflète
nos valeurs

POUR LA SCIENCE

WWW.POURLASCIENCE.FR

8 rue Férou, 75278 PARIS CEDEX 06
Standard : Tel. 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction : Françoise Pétry

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier,

Philippe Ribeau-Géssippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Dossiers Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot,

Sylvie Sobelmann, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Géssippe assisté de Yoan Bassinet

Marketing : Élie Abib

Direction financière : Anne Gusdorf

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 : Gael Chauvin,

Jérôme Degaux, Alain Doressoundiram, Christian Farnier,

Sophie Galléas, Sylvain Guiric, Évelyne Host-Platret,

Stéphanie Jouvrier, Christophe Pichon, Aurélien Roux,

Serge Soula, Daniel Tacquenot, Richard Tailler,

Ibrahima Thieb.

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 Bouffé. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

<http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience>

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Adresse postale :

Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

Commande de livres ou de magazines :

0805 655 255 (numéro vert)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Contact kiosques : À juste titres ; Benjamin Boutonnet

Tel. : 04 88 15 22 41

Canada : Edipresse, 1000 rue de la Paix, 1000 Québec, H3N 1V3 Canada.

Suisse : Servidip, Chemin des chalets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Chaux, 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 : Ricky Rus-

ting, Philip Yam, Tony Stix, Davide Castelvecchi, Graham Collins, Mark Fischetti,

Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong.

President : Steven L. Koch. Vice President : Frances Newburg.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou

francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents con-

tenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific Ameri-

can », 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'adop-

tation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom

commercial « Scientific American » sont la propriété de Scien-

tific American, Inc.

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

duire 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).



ÉDITO

de Françoise Pétry directrice de la rédaction

Information cachée

Selon un principe fondamental de la physique, aucune information n'est jamais perdue. Toutefois, dans les années 1970, l'astrophysicien américain Stephen Hawking a fait trembler ce principe sur son socle en montrant qu'un trou noir peut « s'évaporer ». L'information engloutie disparaît-elle avec lui ? Non. D'après le principe holographique, si la matière disparaît bel et bien, l'information est préservée à la surface du trou noir, l'horizon des événements (voir *L'espace est-il discret ?*, page 24).

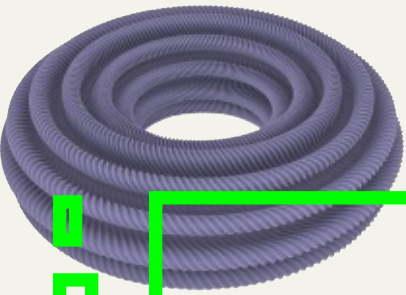
Si, dans ce cas, on voudrait être capable de décoder l'information, parfois on cherche à la dissimuler. C'est ce que font les cryptographes qui inventent des méthodes inviolables pour transmettre des messages que seuls ceux disposant des codes seront capables de lire. L'utilisation d'un ordinateur est généralement nécessaire en raison de la puissance de calcul requise. Pourtant, la cryptographie visuelle ne fait appel qu'au système visuel, bien plus puissant qu'un ordinateur quand on ne s'intéresse pas uniquement aux capacités de calcul (voir *La cryptographie visuelle*, page 86).

L'esprit doit être préparé.

Le système visuel a bien d'autres facultés, par exemple, reconstruire une image tridimensionnelle à partir de l'image à deux dimensions projetée sur la rétine. S'inspirant de cette propriété, des ingénieurs ont mis au point des méthodes qui ont favorisé le développement du cinéma 3D. Si ces techniques présentent encore des difficultés et ne permettent pas d'éviter le port de lunettes spéciales, la télévision 3D sans lunettes est sans doute pour... après-demain (voir *Cinéma, la conquête de la 3D*, page 56).

Mais aussi puissants soient-ils, nos yeux ne voient pas tout, notamment pas les lueurs émises au-dessus des nuages, lors des orages. Les géophysiciens y découvrent diverses émissions lumineuses. Pendant un orage, l'horizon est celui des nuages qui masquent les événements se déroulant au-dessus, plus fugitifs que les éclairs ou se produisant dans des gammes de rayonnements que nos yeux ne perçoivent pas (voir *La face cachée des orages*, page 48).

Toutefois, l'esprit doit être préparé pour que l'on observe ce qui n'avait pas encore été remarqué. Comme le soulignait le biologiste François Jacob dans son ouvrage *La Logique du vivant, une histoire de l'hérédité* (1970) : « Il ne suffit pas de "voir" un objet jusque-là invisible pour le transformer en objet d'analyse. Il faut encore qu'une théorie soit prête à l'accueillir. »

- 1 **ÉDITO**
- 4 **BLOC-NOTES**
Didier Nardon
- Actualités**
- 6 **Le tore plat bien tordu**

- 8 **Le silence des gènes expliqué**
- 10 **Matière noire... et à embarras**
- 11 **Des babouins forts en orthographe**
Il y a bien d'autres sujets.
- 14 **ON EN REPARLE**
- Opinions**
- 16 **POINT DE VUE**
Les pompes solaires : comment s'y préparer ?
Jean Lileux
- 17 **ÉCONOMIE**
Que force l'Italia !
Alain Tremoy
- 18 **DÉVELOPPEMENT DURABLE**
Les beiges végétales : écologiques et économiques
Christel Fiorina
- 20 **VRAI OU FAUX**
Les footballeurs vieillissent-ils toujours ?
Christian Bromberger
- 22 **COURRIER DES LECTEURS**

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement brochés sur la totalité du tirage, une offre d'abonnement Pour la Science 22 et une offre d'abonnement de livres Pour la Science/Belin en p. 8.
En couverture : © Adam Voorhes

À LA UNE

24 **PHYSIQUE** **L'espace est-il discret ?** *Michael Moyer*

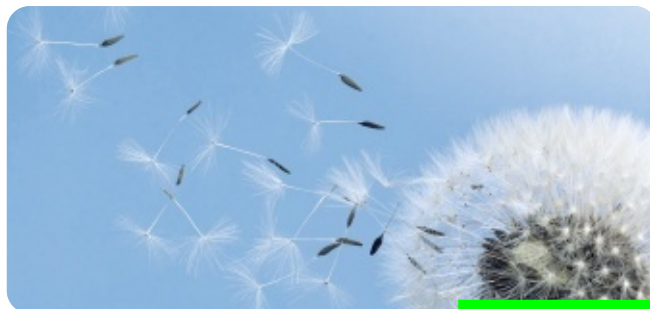
Un dispositif en construction près de Chicago, l'holomètre, tentera de mettre en évidence la nature discrète de l'espace-temps à l'échelle fondamentale. Si l'expérience est couronnée de succès, les lois de la physique seraient à réécrire.

32 **ARCHÉOLOGIE** **Les villes de la Côte des esclaves** *Cameron Monroe*

L'archéologie révèle l'impact de la traite d'esclaves sur les villes et l'organisation des royaumes africains du golfe du Bénin.

40 **ÉCOLOGIE** **Le vent et la dispersion des plantes** *Ángel Felicísimo et Jesús Muñoz*

Dans l'hémisphère Sud, des lieux très éloignés ont en commun de nombreuses espèces végétales. Les vents, plutôt que la dérive des continents, semblent à l'origine de certaines de ces similitudes.



48 **GÉOPHYSIQUE** La face cachée des orages

Elisabeth Blanc et Thomas Faroes

Les orages sont beaucoup plus actifs qu'on ne le pensait. Outre les éclairs, des émissions variées se produisent... au-dessus des nuages.



56 **TECHNOLOGIE** Cinéma, la conquête de la 3D

Thierry Borel

Depuis quelques années, les films en trois dimensions remportent un franc succès. Comment recrée-t-on l'illusion du relief à partir d'images projetées sur un écran binaire ?

64 **MÉDECINE** Le dépistage du cancer de la prostate en question

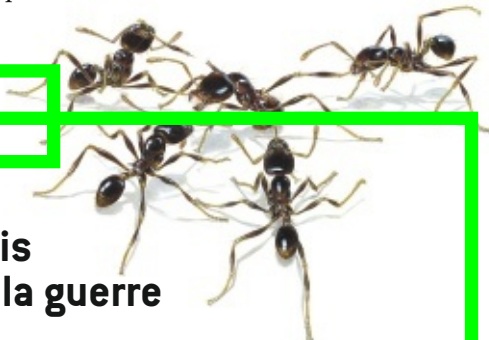
Marc Garnick

Faut-il dépister systématiquement le cancer de la prostate chez l'homme âgé de plus de 50 ans ? Aujourd'hui, beaucoup de médecins pensent que non, parce que les risques semblent l'emporter sur les bénéfices pour certains malades.

72 **ÉTHOLOGIE** Les fourmis et l'art de la guerre

Mark Moffett

Les batailles entre fourmis présentent d'étonnantes similitudes avec certaines opérations militaires humaines. En fonction des enjeux, elles adoptent des stratégies à l'ennemi.



Regards

80 **HISTOIRE DES SCIENCES**

Comment Newton a inspiré la biologie

Pascal Carbonnat

Au XVIII^e siècle, nombre de naturalistes ont invoqué Dieu pour expliquer le vivant et son origine. Peu à peu, l'histoire naturelle s'est affranchie de ces idées grâce à des arguments inspirés de la physique newtonienne.

86 **LOGIQUE & CALCUL**

La cryptographie visuelle

Jean-Paul Delahaye

Une information cachée peut apparaître instantanément à notre œil qui, presque aussi bien qu'un ordinateur, l'extrait d'images grises.

92 **ART & SCIENCE**

Le cheval impossible

Loïc Marguin

94 **EN IMAGES**

Un géant endormi : le volcan du mont Paektu

Sid Perkins

96 **IDÉES DE PHYSIQUE**

Les dégagements du ballon rond

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

100 **SCIENCE & GASTRONOMIE**

Le poison est dans le pré

Hervé This

102 **À LIRE**

Rendez-vous sur **SCIENCE.fr**

» Plus d'informations

- L'intégralité de votre magazine en ligne
- Des actualités scientifiques chaque jour
- Plus de 100 vidéos
- L'agenda des manifestations scientifiques

» Les services en ligne

- Abonnez-vous et gérez votre abonnement en ligne
- Téléchargez les articles de votre choix
- Réagissez en direct
- Consultez les offres d'emploi

www.pourlascience.fr

→ LA FORCE DU ON

Répondre « On ne sait pas » à une question qui vous est posée n'est pas valorisant. Répondre « On ne sait pas » est, puisque cela signifie « Je sais que nul ne sait ». Exemple. Ne rien savoir de la vie de Pythagore est le fait d'un ignorant. Savoir qu'on ne sait rien de la vie de Pythagore est le fait d'une personne éduquée.

L'opposition entre « Je ne sais pas » et « On ne sait pas » devient extrême dans le cas de l'interrogation métaphysique. Si vous dites « Je ne sais pas », vous ne faites que réserver votre jugement ; vous n'êtes parvenu à aucune conclusion quant aux tenants et aboutissants de la condition humaine, mais libre aux autres d'en avoir une. Si vous dites « On ne sait pas », vous tenez pour acquis que personne ne peut savoir, ce qui vous entend que ceux qui ont la foi sont des dupes ou des imposteurs.

« Je ne sais pas » ou « On ne sait pas », telle est la question.



→ CONSCIENCE, MENSONGES ET FOURBERIES

Que nous dit la conscience à l'occasion d'acceptations (faculté qu'a l'individu de connaître sa propre réalité, perception du bien et du mal) n'est pas étonnant. La seconde d'écoute de la première : l'individu ne peut se demander s'il agit bien

ou mal qu'à partir du moment où il a du recul sur lui.

« Agir en conscience » signifie « agir selon le bien ». Peu importe ici qu'aucune définition du bien ne fasse l'unanimité. La langue française nous entend comme allant de soi que, puisque j'ai conscience du bien et du mal, je vais choisir le bien.

L'éthologie est moins idéaliste. Comment décèle-t-elle que les chimpanzés ont une connaissance d'eux-mêmes ? En constatant qu'ils sont capables de se tendre des pièges les uns aux autres, et de tenter de les déjouer. « Si l'on recherche dans le monde animal, les degrés les plus élevés de conscience, il faut s'intéresser aux comportements où s'expriment au plus haut point le mensonge, la fourberie, la trahison et d'autres qualités typiques de l'espèce humaine en général, et de ses classes dirigeantes en particulier » (Jacques Ninio, *Au cœur de la mémoire*, Odile Jacob, 2011, p. 10).

Le jour où notre langue écouterait la leçon de réalisme apportée par l'éthologie, l'expression « agir en conscience » signifierait « prévoir au mieux l'effet de mes actes, de façon à dépouiller mes congénères sans qu'ils soient en mesure de me rendre la pareille. »

→ PSYCHOLOGIE ALGÉBRIQUE

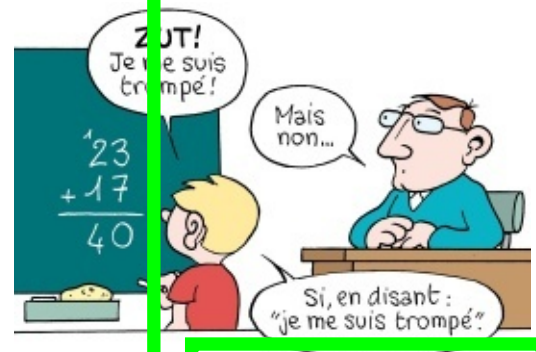
Les hommes n'ont pas tous un bon jugement, mais tous sont persuadés d'en avoir un bon. Ce travers étonne les moralistes. Il n'y a pourtant pas de quoi s'étonner.

Supposons que j'aie un bon jugement et que, m'interrogeant sur moi-même, je me demande si j'ai un bon jugement. Je répondrai à juste titre : oui.

Supposons que j'aie un mauvais jugement et que, m'interrogeant sur moi-même, je me demande si j'ai un bon jugement. Je répondrai en me trompant, puisque j'ai mau-

vais jugement. C'est-à-dire que je répondrai également : oui.

Plus par plus donne plus. Moins par moins donne aussi plus. Si les moralistes voulaient bien étudier un peu d'algèbre, ils y verraient plus clair dans les méandres de la psychologie humaine !



→ PENSÉES SUR LA PENSÉE

Pour ses livres *Comment parler des livres que l'on n'a pas lus ?* (Minuit, 2007) et *Comment parler des lieux où l'on n'a pas été ?* (Minuit, 2012), Pierre Bayard a stimulé l'art des propos mondains. Esprérons qu'il viendra aussi au secours des scientifiques, et publiera *Comment rendre compte d'expériences que l'on n'a pas menées ?* et *Comment démontrer des théorèmes dont on ne comprend pas l'énoncé ?*

En attendant de tels ouvrages, Pierre Bayard m'a convaincu que, n'ayant rien lu de Heidegger sinon sa proclamation, souvenez-vous, « La science ne pense pas », je suis bien placé pour commenter celle-ci.

Donner raison à Heidegger est facile. Il suffit d'ajuster le sens des termes à cette fin, et de caractériser la pensée comme un acte réflexif : le penseur est celui qui s'interroge sur sa propre pensée. Or la science n'a pas pour objet de se mettre en perspective ; ses méthodes ne permettent pas de dire ce qu'elle est. Donc elle ne pense pas. Mais donner tort à Heidegger est tout aussi facile. Il suffit d'ajuster autrement le sens du mot « penser » à la science, en disant :

chant des régularités derrière les phénomènes et en proposant d'attribuer ces régularités à des lois, tente une lecture du monde, et cela s'appelle penser.

Heidegger a beau avoir affirmé qu'il ne blâmait pas la science, sa formule trahit son désir de donner le primat à la philosophie. Rejetons ce jeu pitoyable. La philosophie pense. La science aussi. Évidemment. Elles n'ont d'ailleurs pas de fierté à en tirer, parce que penser n'évite pas de se compromettre avec le pire. La vie de Heidegger lui-même en atteste.

Si j'ai fait des contresens sur Heidegger, la faute en revient à Pierre Bayard.

→ À QUI PROFITE LE PROGRÈS ?

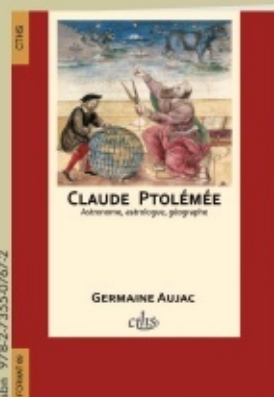
Notre société est constituée d'innombrables composantes n'ayant ni les mêmes buts ni les mêmes atouts. Les avancées qui, *a priori*, paraissent universelles profitent, en fait, aux unes plus qu'aux autres. La technologie tend à aggraver l'exclusion de ceux qui n'ont pas les moyens financiers de suivre. Les progrès de la médecine dépendent d'appareils onéreux, et cela pose la question politique, conflictuelle, de savoir qui va payer.

Les chercheurs et les inventeurs qui, en toute sincérité, escomptent que leurs découvertes profiteront à la société entière négligent le fait que celle-ci n'est pas homogène. Ils risquent de se mettre en réalité au service des plus forts, et d'eux seuls.



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

la plus importante collection d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines



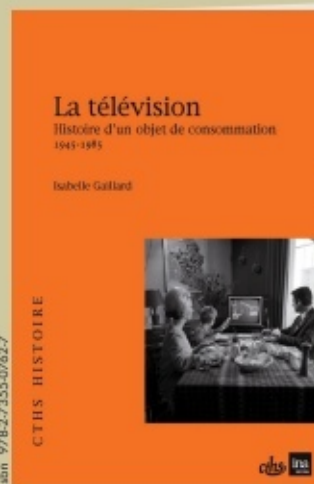
Claude Ptolémée
Astronome, astrologue, géographe
Germaine Aujac

432 pages
12 x 18,5 cm
15 €



Histoire de l'anthropologie
de la parenté
Autour de Paul Lacombe (1834-1919)
sous la direction de
Agnès Fine et Nicolas Adell

408 pages
17 x 22 cm
28,40 €



La télévision
Histoire d'un objet de consommation
(1945-1985)
Isabelle Gaillard

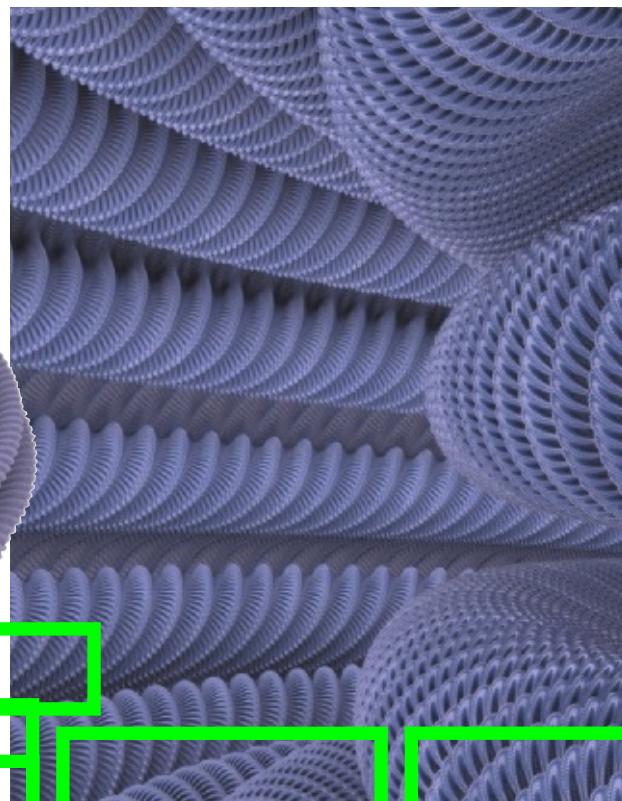
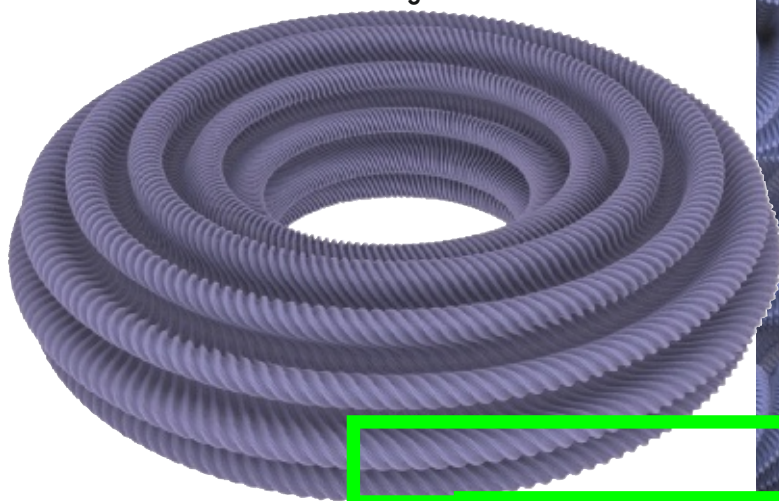
368 pages
15 x 22 cm
28 €

* ventes@cths.fr * vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr * Distribution SODIS

Mathématiques

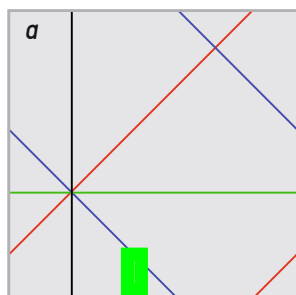
Le tore plat bien tordu

Transformer un carré plat en un tore sans modifier les longueurs : c'est ce qu'ont fait des chercheurs de Grenoble et Lyon.

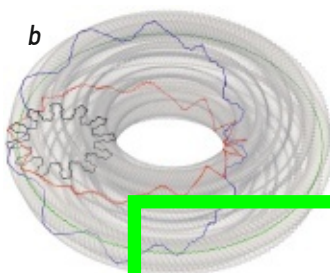


V. Borrelli, S. Jabrane, F. Lazarus et B. Thibert

Le tore obtenu par plongement isométrique dans l'espace tridimensionnel du tore carré plat, vu de l'extérieur (*à gauche*) et de l'intérieur (*à droite*).



V. Borrelli, S. Jabrane, F. Lazarus et B. Thibert



Les quatre droites tracées sur le tore carré plat (*a*, en rouge, bleu, vert et noir) sont transformées par plongement isométrique en quatre courbes fermées sur la surface tordue de l'espace tridimensionnel (*b*), tout en gardant leurs longueurs initiales.

Un tore ordinaire est une surface fermée en forme de donut. Il peut être obtenu en courbant un carré de façon à joindre ses côtés deux à deux opposés. Une version abstraite de cette opération consiste à garder le carré plat, mais à identifier ses côtés opposés, de sorte qu'un mobile qui sort du carré par l'un des côtés y revient immédiatement en pénétrant par le côté opposé (comme dans l'ancien jeu vidéo *Pacman*). Le carré muni de cette identification est nommé « tore carré plat ».

Quand on passe du tore carré plat au tore ordinaire, la topologie est préservée, mais pas les distances. Quatre chercheurs de Grenoble et de Lyon (Institut Camille Jordan, GIPSA-lab et Laboratoire Jean Kuntzmann) ont pourtant construit un tore en 2D qui conserve les distances tracées sur le tore carré plat. C'est ce qu'on appelle un plongement isométrique (le terme isométrie désigne toute transformation qui conserve les longueurs).

Dans les années 1950, le Néerlandais Nicolaas Kuiper et l'Américain John Nash avaient montré

qu'un plongement isométrique est possible si l'on n'est pas trop exigeant sur la régularité de la surface obtenue. Plus précisément, c'est possible si cette dernière est de classe C^1 (surface continue et ayant des dérivées premières continues en tous ses points), mais pas si elle est de classe C^2 (dérivées secondes continues, en plus des conditions C^1). Mais personne n'avait jusqu'alors réussi à appliquer le procédé indiqué par Kuiper et J. Nash pour obtenir une représentation du tore.

Vincent Borrelli, Saïd Jabrane, Francis Lazarus et Boris Thibert ont exploré une technique abstraite puissante, dite de l'intégration convexe, due au Russe Mikhail Gromov et développée dans les années 1970-1980. Ils ont ainsi conçu un programme réalisant une suite de plongements du tore carré plat dans l'espace, les quels deviennent de plus en plus proches d'un plongement isométrique (celui-ci étant atteint à la limite).

Le tore plat est d'abord transformé en un tore ordinaire où toutes les longueurs sont raccourcies, puis

ce dernier est déformé par une succession d'ondulations, dénommées corrugations, de plus en plus fines. Les déformations sont telles que les longueurs sont étirées différemment selon les directions, jusqu'à ce que l'on retrouve, à la limite, les mêmes longueurs que dans le tore carré plat.

Quatre itérations ont suffi pour construire une surface qui ne se voit plus de façon visible. Elle ressemble à une fractale, avec des corrugations s'emboîtant à toutes les échelles, mais ce n'est pas exactement une. En effet, cette surface touche en tout point un plan tangent. Contrairement aux fractales, beaucoup plus irrégulières, V. Borrelli et ses collègues ont qualifié de « fractale C^1 » le type de surface obtenue.

Ces travaux ont une portée plus grande qu'il n'y paraît. Entre autres, ils montrent que l'intégration convexe est utile pour calculer des solutions d'équations aux dérivées partielles, omniprésentes dans les sciences.

→ Maurice Mashaal

V. Borrelli et al., *Journal of Computer Graphics*, 20 avril 2012

Paléontologie

Un spinosaure en Asie

Égypte, Anguette, Niger et Brésil : ce sont les seuls pays où l'on avait découvert des spinosaures, dinosaures carnivores au museau allongé et doté de dents proches de celles des crocodiles. Dès lors, on imaginait que le continent asiatique n'avait hébergé aucun de ces reptiles. C'était une erreur ! Ronan Allain, du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN/UPMC), et ses collègues ont mis au jour un spinosaure à Tang Vay, au Laos.

L'animal est nommé *Ichthyovenator laosensis*, soit « le chasseur laotien de poissons », en référence à son régime piscivore. Avec une gueule de crocodile, les spinosaures se distinguent souvent par une voile, portée par des pro-

longes et osseuses (des épines neurales) des vertèbres dorsales et caudales. Cette spécificité a conduit les paléontologues à l'identification du fossile.

Précisons que cette découverte, qui prouve la présence de spinosaures en Asie, et donc dans

le monde entier, valide les travaux du paléontologue français Eric Buffetaut. Ce dernier avait formulé cette hypothèse dès 1986, sur la base de données mises au jour en Thaïlande.

→ Loïc Mangin

Naturwissenschaften, en ligne, 18 avril 2012



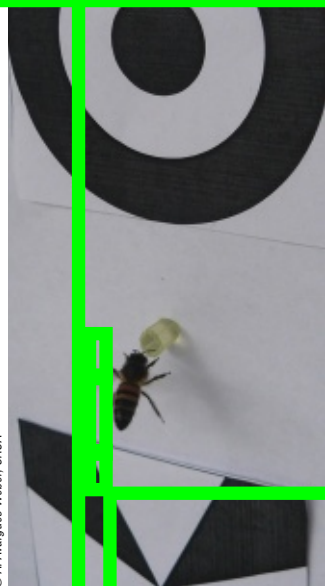
Ichthyovenator laosensis.

Neurosciences

Les facultés conceptuelles des abeilles

Motus d'un millimètre cube : c'est la taille du cerveau d'une abeille, qui comprend environ 960 000 neurones, contre 100 milliards pour un cerveau humain. Pourtant, les capacités cognitives de l'insecte sont étonnantes. Avec leurs collègues, Andrea Avarguès-Weber et Martin Giurfa, de l'Université de Toulouse, ont montré que l'abeille est capable, pour prendre une décision, d'utiliser simultanément deux concepts abstraits (indépendants d'objets physiques particuliers), à savoir ceux de position relative et de différence.

Dans leur expérience, les chercheurs affichaient deux images tantôt l'une au-dessus de l'autre, tantôt côte à côte. Un orifice situé entre les deux images donnait soit une récompense (une goutte d'eau sucrée), soit une sanction (une goutte de quinine). Les abeilles étaient entraînées à privilégier l'une ou l'autre des relations spatiales entre les images pour se-



Les abeilles ont été entraînées à reconnaître des relations particulières entre deux images (par exemple, des images distinctes et situées l'une au-dessus de l'autre). Le dispositif visible au centre livre une récompense ou une sanction.

taints motifs, par exemple, des images l'une au-dessus de l'autre étaient systématiquement associées à la récompense. En outre, lors de l'entraînement, les deux images étaient différentes, afin de tester si les abeilles intégraient aussi cette relation.

Après une trentaine d'essais, ce qui correspond à un entraînement d'environ trois heures, les abeilles choisissaient toujours les combinaisons gagnantes : des images différentes et qui présentaient la disposition spatiale récompensée (par exemple, « l'une au-dessus de l'autre »). Elles faisaient ce choix même quand elles étaient confrontées à des images qu'elles n'avaient jamais vues. Cela signifie que leur cerveau, bien que minuscule, avait intégré les concepts de position relative et de différence, indépendamment des objets physiques qui les sous-tendent.

→ Guillaume Jacquemont

PNAS, en ligne, 19 avril 2012

Santé

SOINS AUX NANOPARTICULES

Une maladie nommée infirmité motrice cébrale est responsable de troubles moteurs chez environ trois enfants sur 1 000. Des chercheurs américains l'ont partiellement soignée chez le lapin, à l'aide d'une molécule anti-inflammatoire liée à une nanoparticule (un polymère synthétique). Les nanoparticules ont fait franchir la barrière hémato-encéphalique au médicament et l'ont guidé jusqu'aux cellules cérébrales lésées, selon des mécanismes que l'équipe a découverts.

RECORD : NEUF PLANÈTES

Le spectromètre HARPS, installé sur un télescope européen à La Silla, au Chili, mesure les variations de vitesse radiale d'une étoile dues aux planètes en orbite. Suite à une nouvelle analyse des données de cet observatoire, l'astronome Mikko Tuomi, de l'Université de Hertfordshire, a calculé qu'il y aurait neuf planètes autour de l'étoile HD 10180 et non sept comme on le pensait. Les découvertes sont des preuves de la présence de la planète. Par son nombre de planètes, ce système est le plus important connu à ce jour.

MOINS DE ZONES HUMIDES

Les zones humides (marais, tourbières, etc.) se raréfient : à l'échelle du globe, leur étendue a diminué de six pour cent entre 1993 et 2007. Des chercheurs du CNRS et de l'IRD l'ont montré à partir de cartographies effectuées par satellite. La contraction est la plus forte dans les régions où la population a le plus augmenté. Cela confirme le rôle de l'homme, notamment dans le séchage des marais pour l'urbanisation et les prélèvements d'eau pour l'agriculture.

Génétique

Le silence des gènes expliqué

Les microARN sont des petites molécules d'ARN dites non codantes (elles ne sont pas traduites en protéines) qui jouent un rôle important dans le contrôle de l'expression des gènes. Normalement, un ARN messager, noté ARNm, code une protéine. Mais quand un microARN s'associe à un ARNm, il l'empêche d'être traduit en protéine. On ignorait cependant le détail de cette répression : s'agit-il d'un « simple » blocage, ou d'association entre le microARN et l'ARNm conduisant à la dégradation de l'ARNm ?

Deux équipes, celle de George Djuranovic, de l'Université Johns Hopkins, et celle de Ariel Bazzini, de l'Université Yale, ont précisé

les étapes de ce mécanisme essentiel par lequel des gènes sont réduits au silence.

Le premier groupe s'est intéressé à la cinétique des événements : dans des cultures de cellules issues de mouches drosophiles, le second a étudié le fonctionnement des microARN chez le poisson zèbre. Leurs travaux montrent qu'un microARN bloque la traduction d'un ARNm, et que cet ARNm subit ensuite une transformation nommée déadénylation, qui est éliminée la queue poly(A) — une suite de nucléotides de type adénosine (A) située à l'extrémité des ARNm. Cette queue poly(A) est essentielle à l'initiation de la traduction en protéine

et à la stabilité de l'ARNm : la durée de vie d'un ARNm dans le cytoplasme est d'autant plus longue que celle de sa queue poly(A). La son élimination opérée par le microARN entraîne la rapide dégradation de l'ARNm.

On a déduit que le microARN agit grâce à deux mécanismes indépendants, le blocage de la traduction et la déadénylation, ce qui optimise la répression de l'ARN cible, donc du gène correspondant. L'importance de chaque processus dépendait du microARN concerné, mais aussi du type de cellule.

Un microARN. Ce type de molécule empêche un gène de s'exprimer en bloquant l'ARN messager correspondant et en le transformant.

S. Djuranovic et al., *Science*, vol. 336, pp. 237-240, 2012 ;
A. Bazzini et al., *ibidem*, pp. 233-237

90×10^{-18} JOULE : le dispositif optoélectronique conçu par l'équipe d'Edo Waks, aux États-Unis, n'a besoin que de cette énergie pour rediriger un faisceau lumineux.

Astrophysique

Des poussières dans l'œil de Fomalhaut

La photographie de l'étoile Fomalhaut prise par le télescope *Hubble* en 2004 a marqué les esprits car elle rappelait l'œil de Suron dans le film *Le seigneur des anneaux*. Pour les astrophysiciens, cette étoile jeune — âgée de quelques centaines de millions d'années et distante de 25 années-lumière — est un objet d'étude riche d'enseignement sur la formation des systèmes stellaires. Elle héberge, à plus de trois fois la distance Soleil-Pluton, un anneau de débris et de poussière et, probablement, des planètes qui, en attirant la matière, rendent nets les bords de l'anneau. Des astrophysiciens ont utilisé l'interféromètre APOGEE, dans le désert d'Atacama, au Chili, pour étudier

ces planètes. Ils montrent que leur masse est au plus quelques fois celle de la Terre. On pensait jusqu'à présent qu'il s'agissait de planètes géantes gazeuses.

D'après les observations du télescope spatial *Herschel*, l'an-

neau est constitué de grains de poussière dont la taille ne dépasse pas quelques micromètres. Ces particules s'agglomèrent en aggrégats peu liés, de la même façon que les particules de poussière cométaire du Système solaire.

Cependant, comment se régénère cet anneau de fines poussières qui, normalement, devraient être soufflées par le vent stellaire ? L'équipe de *Herschel* suppose que des collisions fréquentes d'astéroïdes le réapprovisionnent en grains de poussière. Pour compenser les pertes dues au vent stellaire, il faudrait quotidiennement 2000 collisions d'objets de plus de un kilomètre de diamètre. On en déduit la présence de plus de 1000 milliards d'astéroïdes dans l'anneau, ce qui représente plus d'une centaine de fois la masse de la Terre.

→ Sean Banerjee

A. C. Boley et al., *Astrophys. J. Lett.*, à paraître ;
B. Acke et al., *Astronomy & Astrophysics*, 550, A105, 2012



L'étoile Fomalhaut et son anneau de poussière vus par *Herschel*.

Archéologie

Embuscade à l'âge du bronze

Rien n'est plus rare qu'un site de bataille bien conservé. D'ordinaire, les cadavres pourrissent, les os blanchissent et disparaissent, les armes et bagages sont récupérés. Plus tard, la charrie détruite reste. Aussi la découverte des restes d'une embuscade qui s'est produite il y a 3250 ans dans la vallée du Tollensetal, en Allemagne, est-elle exceptionnelle.

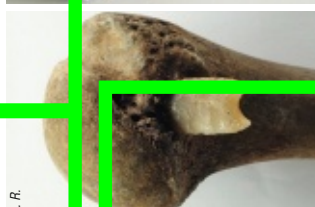
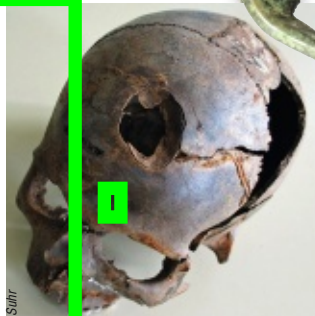
Un groupe d'une centaine de personnes s'était apparemment engagé dans une petite vallée marécageuse traversée d'un cours d'eau, quand un parti plus nombreux l'a attaqué. Les hommes jeunes (la majorité des victimes), dont certains étaient à cheval, ont défendu le groupe, mais n'ont pas eu le dessus. Les fuyards ont suivi la rivière, mais ont été rattrapés, abattus et jetés dans l'eau, ce qui explique l'excellente conservation de leurs restes.

Manifestement la bataille violente, visant l'extermination même

si n'a soulevé la présentation des jeunes femmes parmi les victimes suggère que certaines ont été capturées. Sur les 89 individus identifiés par des restes, 40 portent des traces de percussion. L'un des coups de massue constatés sur les crânes correspond à une arme en forme de maillet, que l'on a retrouvée. Une flèche en silex est restée fichée dans le coude d'un des cavaliers. Il semble que l'armement de l'un des camps était en bois et silex, tandis que celui de l'autre était au moins en partie en bronze (pointes de flèches et de lances). Trop proches et trop proches des corps pour être perdus, les événements ont sans doute été toutes récupérées.

À une époque où la densité de population était très faible, le rassemblement de plus de cent victimes de guerriers était un événement majeur. Reste à en expliquer la raison.

➔ *Emmanuelle Savatier*

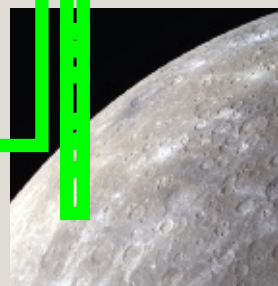


Le crâne ci-dessus (au milieu) a été enfoncé par une sorte de marteau en bois. Les deux pointes de flèche, l'une en bronze (en haut) et l'autre en silex (en bas), illustrent l'importance de l'arc dans

En l'espace

MERCURE UN GRAND CŒUR

Grâce à l'analyse des anomalies du champ gravitationnel, des relevés topographiques et des études spectrométriques, la sonde *Messenger* dévoile la structure interne de Mercure. Cette planète est atypique avec un cœur volumineux, qui représente 85 pour cent du rayon total. Autre particularité, le noyau est séparé du manteau par une couche d'environ 100 kilomètres d'épaisseur, qui serait riche en fer et en soufre. Reste à intégrer ces résultats dans un scénario cohérent de la formation de Mercure.



MASA/Univ. Johns Hopkins/INRA

Physico-chimie

Du sable au verre : un suivi en temps réel

La difficulté majeure dans la fabrication du verre est d'éliminer les cristaux non fondus et les bulles. L'industrie utilise des mélanges de sable et de carbonates de calcium et de sodium, qui fondent à environ 1050 °C, mais qui sont portés à 1500 °C pour que tous les défauts soient éliminés. Un procédé efficace, mais très coûteux en énergie. L'amélioration des techniques de production passe par une meilleure compréhension des pro-

cessus microscopiques à l'œuvre. Emmanuelle Goullart, du Laboratoire du verre et interfaces (CNRS/Saint-Gobain), à Aubervilliers, et ses collègues ont œuvré en ce sens. À l'ESRF, l'installation européenne de rayonnement synchrotron, à Grenoble, ils ont suivi par microtomographie par rayons X la transforma-

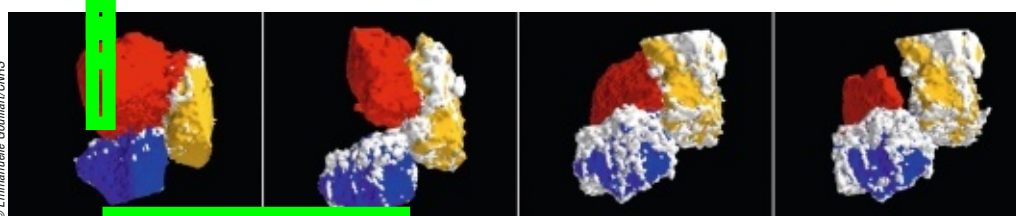
tion du sable en verre. Le carbonate de sodium agit comme un fondant : il abaisse la température de fusion du mélange

de silice qui fondrait à 1750 °C. L'étude montre qu'au-dessous de 750 °C les cristaux de carbonate de sodium se déforment pour épouser la forme des cristaux de silice. Ces éléments réagissent pour former des silicates de sodium.

Le carbonate de calcium protège chimiquement le verre, en particulier vis-à-vis des effets de l'humidité. Quant au dioxyde de sodium, il forme des carbonates doubles. Isolé, il se dissocie en chaux et en dioxyde de carbone.

À partir de 810 °C, les premiers cristaux fondent. Mais, en fonction des contacts entre les constituants, certains cristaux ne fondent qu'à des températures supérieures : les grains de silice qui ne sont pas entourés de silicate de sodium sont toujours stables à 900 °C et peuvent créer des défauts dans le verre. Des pistes pour améliorer la fabrication du verre ?

E. Goullart et al., *The Journal of the American Ceramic Society*, en ligne, 19 mars 2012



Un grain de carbonate de sodium (en rouge) et des grains de silice (en jaune et en bleu). L'élévation de température entraîne la formation de silicate de sodium (en blanc) qui enrobe les grains de silice

© Emmanuelle Goullart/CNRS

Écologie

Manchots comptés de haut

Les manchots empereurs sont plus nombreux qu'on ne le croyait. C'est ce qu'indiquent les recensements effectués à partir d'images satellitaires par Peter Fretwell, du *British Antarctic Survey*, et ses collègues : les oiseaux adultes seraient près de 600 000, contre 270 000 à 300 000 selon les estimations précédentes.

Les manchots empereurs, qui vivent dans l'océan, en sortent plusieurs mois par an pour pondre et couvrir. Ils forment alors de grandes colonies, bien visibles sur les étendues blanches de l'Antarctique. Les satellites en ont pris des photographies en haute définition, améliorées ensuite par divers traitements. Les scientifiques ont estimé le nombre d'individus dans chaque colonie grâce à une relation liant ce nombre à la surface occupée par les manchots, avec des corrections pour prendre en compte les oiseaux absents, tels les individus trop jeunes pour couvrir, et restés en mer. C'est le premier recensement d'une espèce effectué depuis l'espace.



Sur cette vue obtenue par satellite, les colonies de manchots apparaissent en noir et leurs traînées de guano en marron.

→ G. J.

P. Fretwell et al., *PLoS ONE*, 2012, 7, 12, e40112.

Biologie

De la résistance cellulaire

Qu'est-ce qui confère la résistance des cellules, capables de supporter de fortes tensions sans se déchirer ? De leur faculté à recruter des lipides en masse dans leur membrane en cas de stress mécanique. En cherchant la réponse de cellules de levures à des contraintes, les équipes de Tobias Walther, de l'Institut Max Planck de biochimie de Martinried, en Allemagne, et de Robbie Loewith, de l'Université de Genève, ont précisé l'un des mécanismes de ce recrutement.

Composée de protéines et de lipides, la membrane cellulaire est constituée de divers domaines, notamment des « eisosomes » répartis régulièrement à la surface de la cellule. Les biologistes ont montré qu'ils jouent un rôle majeur dans le recrutement de lipides. Quand une forte contrainte est exercée sur la cellule, une protéine des eisosomes se déplace vers d'autres domaines membranaires, lesquels contiennent un complexe qui régule la production de lipides, TORC2. La protéine se lie à ce complexe et le suractive, ce qui augmente la production de lipides ; ces derniers s'insèrent alors dans la membrane. Lorsque la tension se relâche, les eisosomes cessent d'être yncréteurs de lipides, et TORC2 stoppe la production de lipides supplémentaires.

→ Marie-Neige Cordonnier

D. Berchem et al., *Nature Cell Biology*, prépublication en ligne, 15 avril 2012

Astrophysique

Matière noire... et à l'embarras

Depuis 1933 et les premières hypothèses sur la masse manquante du Suisse Fritz Zwicky, la matière noire pose des soucis aux scientifiques. On interprète de nombreuses observations en supposant qu'elle existe en quantité cinq fois supérieure à la matière ordinaire dans l'Univers. Elle explique par exemple le mouvement des étoiles dans les galaxies spirales ou certaines caractéristiques du fond diffus cosmologique. Mais il s'agit d'observations indirectes de la matière noire, dont la nature reste inconnue.

Christian Moni Bidin et ses collègues de l'Université Conception au Chili, ont étudié, avec un télescope de 2,2 mètres de diamètre de l'Observatoire européen austral de La Silla, le mouvement de 400 étoiles géantes rouges à moins de 15 000 années-lumière du Soleil. Ils ont montré que la matière ordinaire suffit pour expliquer les forces gravitationnelles qui régissent le déplacement de ces étoiles. Ces astrophysiciens concluent que les environs du Soleil sont dépourvus de matière noire. Selon eux, la distribution de cette dernière dans la galaxie n'est pas sphérique comme on le suppose généralement, mais s'étend plus loin du disque galactique, de façon que le Soleil soit en dehors de la zone de matière noire.

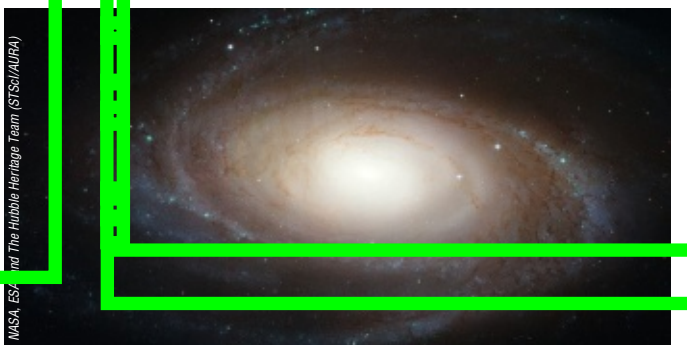
Ce résultat, s'il se confirme, est une nouveauté nouvelle pour les

expériences de détection directe. Le principe en est simple : des capteurs traquent l'interaction, au sein du détecteur, d'une particule de matière noire avec un atome. Ces événements sont rares et si la Terre est dans une région pauvre en matière noire, la probabilité de détecter un signal diminue drastiquement.

Cependant, Juan Collar et ses collègues, de l'expérience CoGeNT, dont le détecteur est situé dans la mine Soudan, dans le Minnesota, viennent d'annoncer qu'ils ont obtenu un résultat similaire à celui de l'installation italienne DAMA, au Gran Sasso. Il s'agit d'un signal périodique annuel qui peut s'interpréter ainsi : si le Soleil se déplace par rapport à la matière noire de la galaxie, alors la Terre va connaître le « vent » de matière noire pendant la moitié de sa révolution autour du Soleil (six mois) ; le nombre de particules qui croisent les détecteurs est alors plus important qu'au cours des six autres mois, lorsque la Terre va dans le même sens que le vent. Mais contrairement à DAMA et CoGeNT, l'expérience CDMS, également dans le Minnesota, ne détecte pas ce signal périodique. La matière noire ne semble pas prête de s'éclaircir.

→ J. S. B.

C. Moni Bidin et al., <http://arxiv.org/abs/1204.3924> ;
I. Collar et N. E. Fields, <http://arxiv.org/abs/1204.3559>



Quelle est la forme du halo de matière noire dans une galaxie spirale telle que M81 (ci-dessus) ou la Voie lactée : une boule ou une queue ?

Neurosciences

Des babouins forts en orthographe

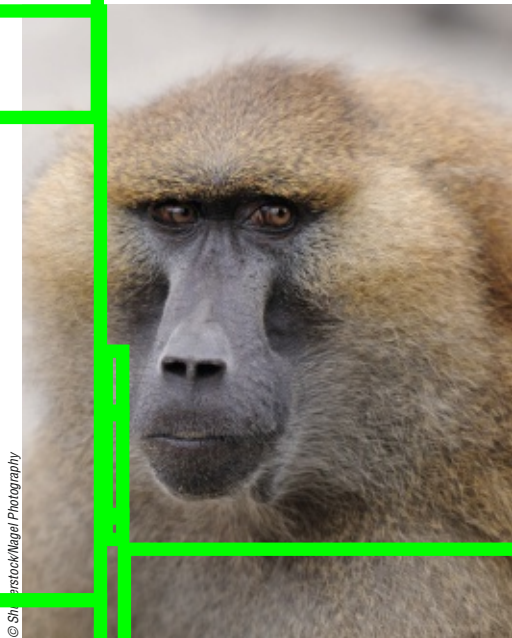
Comment distingue-t-on, en une fraction de seconde, un mot d'une succession aléatoire de lettres ? En lui attribuant un sens, comme le postule la théorie dominante, ou en détectant certaines régularités formelles dans l'enchaînement des lettres ? Jonathan Grainger, de l'Université d'Aix-Marseille, et ses collègues penchent pour la seconde hypothèse : ils ont appris à des babouins à distinguer des mots écrits de pseudomots (des séquences de lettres dépourvues de sens), ce qui montre qu'une telle distinction est possible en l'absence de facultés linguistiques.

Pour enseigner un nouveau mot à un babouin, les chercheurs lui présentaient des séquences de quatre lettres par tranches de 100 : dans 25 cas, il s'agissait du nouveau mot, dans 25 autres, de mots appris précédemment ; et dans les 50 cas restants, de pseudomots. En pressant une forme ovale ou une croix sur un écran

tactile, le babouin indiquait s'il était confronté à un mot ou à un pseudomot. Il recevait une récompense en cas de bonne réponse. L'animal identifiait ainsi un mot comme une séquence de lettres qui lui était régulièrement présentée (les pseudomots, eux, variaient souvent), sans lui attribuer de contenu sémantique.

Les babouins ont appris plusieurs dizaines, voire centaines, de mots. À mesure des apprentissages, ils distinguaient de plus en plus souvent un pseudomot d'un mot dès la première présentation de ce dernier : ainsi, les singes décelaient les régularités dans l'organisation des mots, tels des groupes de deux lettres apparaissant fréquemment. Cette capacité d'analyse statistique semble donc partagée par l'homme et par certains primates, ce qui suggère qu'elle remonte à l'un de leurs ancêtres communs.

→ G. J.

J. Grainger et al., *Science*, vol. 336, pp. 245-248, 2012

Les babouins partagent avec l'homme des facultés de reconnaissance visuelle et d'analyse statistique, grâce auxquelles ils peuvent apprendre à distinguer un mot d'une séquence aléatoire de lettres.

JUSQU'AU 2 JUILLET 2012

AU FIL DES ARAIGNÉES

EXPOSITION AU JARDIN DES PLANTES

GRANDE GALERIE DE L'ÉVOLUTION
36 RUE GEOFFROY SAINT-HILAIRE — PARIS 5^e
<http://araignees.mnhn.fr>

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

Logos partenaires : e, new.com, LE FIGARO, SCIENCE, PSYCHOLOGIES, SCIENCES AVENIR, ANOUS PARIS, Wapiti, metro, Inté, S.

Histoire des sciences

Deux lettres de Descartes

Erik-Jan Bos, de l'Université d'Oxford, vient de raconter comment, en 2009, il a retrouvé sur Internet une lettre de Descartes. Préparant une édition critique de la correspondance du philosophe et soucieux de ne manquer aucune référence, il tape souvent dans Google les mots «Descartes» et «Autograph letter» (lettre manuscrite). Un jour, le moteur de recherche indique un résultat qui lui est inconnu. John Anderies, le conservateur des collections de l'Université de Haverford, en Pennsylvanie, qui détient le document, lui en fait parvenir une copie. E.-J. Bos découvre alors une lettre volée en France au XIX^e siècle, dans laquelle Descartes confie à son ami Mersenne qu'il a remanié à la dernière minute l'introduction de ses *Méditations métaphysiques*. Par ailleurs, Jean Bonna, collectionneur suisse et correspondant de l'hebdomadaire *Le Monde*, vient de découvrir, récemment découvert dans une vente aux enchères une autre lettre perdue. Descartes s'y adresse, *à son Monsieur, un philosophe anglais*, Hobbes... Des dizaines d'autres lettres restent à retrouver.

www.bibliotheque-institutdefrance.fr/actualites/Descartes_Haverford.html

Astrophysique

Pas de sursauts à neutrinos

En Amérique, une équipe internationale traque les neutrinos cosmiques avec l'expérience IceCube – des détecteurs pris dans la glace et sensibles au rayonnement Cerenkov émis par le passage d'un muon, une particule chargée née de l'interaction d'un neutrino avec la matière. Un groupe de physiciens s'est intéressé aux neutrinos provenant des sursauts gamma, des événements violents à l'origine des rayons cosmiques de très haute énergie. Ces sursauts proviennent soit d'étoiles très massives qui s'effondrent en trou noir, soit de la coalescence d'un système binaire d'objets compacts (étoiles à neutrons ou trous noirs). Ces deux phénomènes créent une explosion qui libère une grande quantité d'énergie sous forme de photons, d'électrons, de positrons et de protons. Des neutrinos sont aussi produits, mais, en étudiant plus de 300 sursauts gamma, IceCube n'en a détecté aucun. Les modèles actuels décrivant les sursauts gamma surestiment-ils la quantité de neutrinos produits?

→ S. B.

1-354, 2012

Physique

Interférences de molécules massives

Marcus Arndt et ses collègues, des physiciens de Vienne, Tel-Aviv, Karlsruhe et Bâle, ont mis au point un nouveau dispositif permettant d'obtenir des interférences d'ondes de matière associées à des molécules massives.

Dès 1933, le physicien français Louis de Broglie émit l'hypothèse – depuis confirmée – de la dualité onde-corpuscule : tout objet a un comportement à la fois d'onde et de particule. Mais comme la longueur d'onde est d'autant plus petite que l'objet est massif, il est difficile de voir les effets ondulatoires sur les particules lourdes.

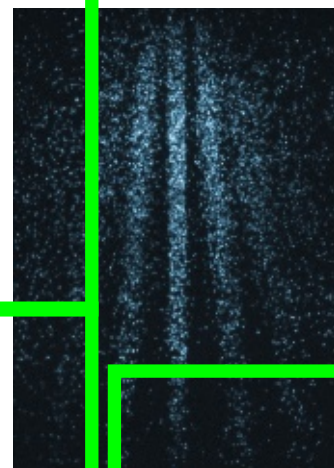
Dans l'expérience des fentes de Young, deux fentes étroites et proches sont éclairées par un faisceau lumineux ; un écran placé derrière les fentes restitue la figure d'interférence : une série de bandes lumineuses et sombres, ou franges. De façon étonnante, si on reproduit cette expérience photon par photon – les particules de la lumière –, l'accumulation des points d'arrivée des particules reproduit la même figure d'interférence. En 1976, la même expérience était réalisée avec des électrons.

Jusqu'à où peut-on augmenter la masse des particules utilisées? Manfred T. Juffmann et ses collègues ont réalisé un réseau ultrafin – un ensemble de fentes parallèles fondé sur le même principe que les fentes de

Young – ainsi qu'un dispositif optique permettant de localiser chaque molécule sur l'écran avec une précision de dix nanomètres. Ils ont procédé avec des molécules organiques, la phtalocyanine et l'un de ses dérivés (514 et 1298 unités de masse atomique). Les physiciens ont obtenu en quelques minutes une figure d'interférence de ces molécules. Ce dispositif pourrait être utilisé pour déterminer la dualité onde-corpuscule à des échelles de plus en plus grandes.

→ S. B.

T. Juffmann et al., *Nature Nanotechnology*, en ligne, 25 mars 2012



T. Juffmann et al., *Nature Nanotechnology*

image en fluorescence (fausses couleurs) d'une figure d'interférence obtenue avec des molécules de phtalocyanine.

DERNIÈRE minute ...

UNE ÉTOILE DÉCHIRÉE PAR UN TROU NOIR

À quelque deux milliards d'années-lumière de nous, une étoile vient d'être déchirée par les forces de marée d'un trou noir. C'est ce qu'ont annoncé des astronomes américains, qui ont observé le phénomène grâce aux données de l'étoile tombant à grande vitesse vers le trou noir. Pour la première fois, ils ont identifié précisément les deux astres : un trou noir

de deux millions de masses solaires et une géante rouge ayant perdu son enveloppe.

LES JUMENTS, PLUS DOMESTICABLES

Selon l'équipe de Vera Warmuth, de l'Université de Cambridge, le chevreau le plus domestiqué à l'Ouest de la steppe eurasiatique, il y a quelque 6 000 ans, puis les troupeaux de chevaux domestiques se sont multipliés vers l'Est. Dans

ce processus, les éleveurs auraient capturé des juments sauvages, ce qui expliquerait la grande diversité mitochondriale (due aux juments) et la faible variété du chromosome Y (due aux étalons) constatées.

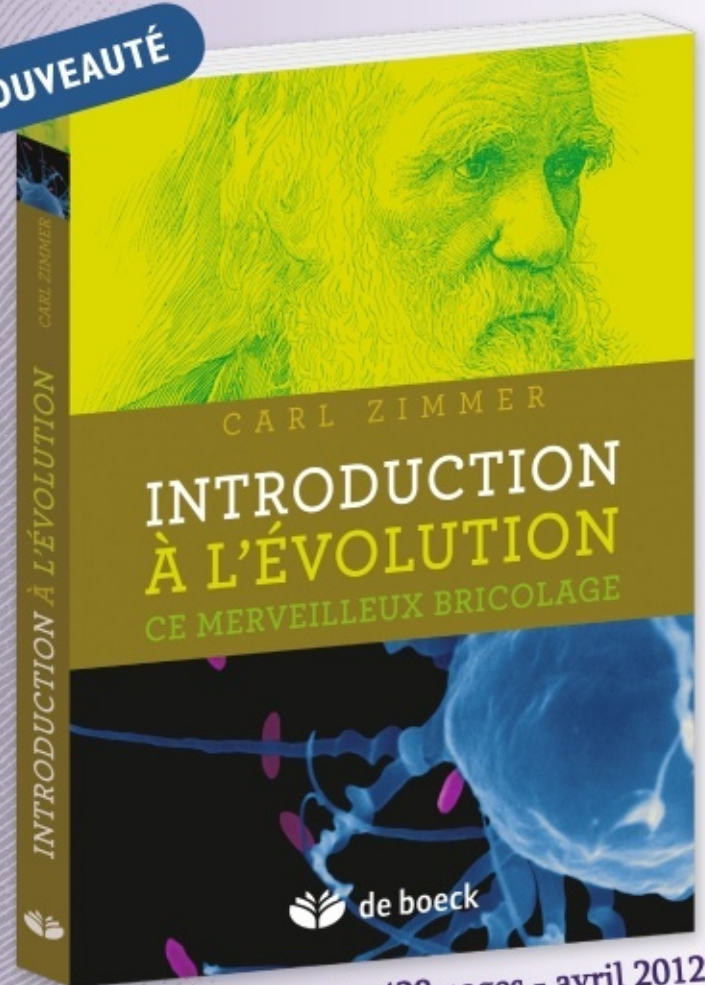


Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur www.pourlascience.fr

INTRODUCTION À L'ÉVOLUTION

CE MERVEILLEUX BRICOLAGE
CARL ZIMMER

NOUVEAUTÉ



47 € - 428 pages - avril 2012

L'évolution est davantage qu'une théorie : c'est une façon de comprendre le monde.

Cet ouvrage retrace les grandes lignes de la science de l'évolution, depuis les pré-darwiniens jusqu'aux derniers développements en génétique et en médecine évolutionniste.

L'étude des phénomènes du monde vivant, tels que la sélection naturelle, l'évolution et la disparition des espèces, n'est pas un champ réservé aux seuls chercheurs. En effet, les implications de ces phénomènes sur notre existence sont nombreuses et colossales.

Un livre abondamment illustré qui offre une introduction claire et complète à l'évolution.



En librairie et sur www.deboeck.com



de boeck

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

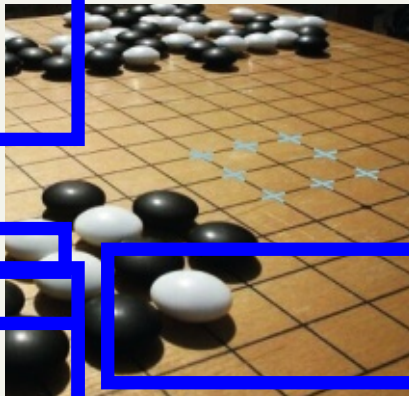
→ LE TRANSPORT DU FLORIGÈNE

La floraison est le mécanisme essentiel de la reproduction des plantes à fleurs. En 2009, François Parcy expliquait notamment que le «florigène», c'est-à-dire le signal produit dans la feuille et provoquant l'apparition du bouton floral au sommet de la tige, était la protéine FT (voir «Mais qu'est-ce qui fait fleurir les plantes ?», *Pour la Science*, juillet 2009, http://bit.ly/PLS381_Parcy).

Toutefois, le transport du florigène dans les vaisseaux de la plante restait mal compris. Lu Chiu et des collègues de l'Université de Singapour viennent de faire un progrès notable (*PLoS Biology*, 17 avril 2012). Ils ont montré qu'une protéine de la membrane du réticulum endoplasmique – une «usine» de transformation des protéines présente chez tous les eucaryotes (organismes dont les cellules ont un noyau) – s'associe à la protéine FT. Cela permet au florigène de passer des «cellules compagnes», où il est produit, aux cellules du tube criblé qui sont le point d'entrée dans le système vasculaire assurant le transport de la sève. Ils ont nommé cette protéine régulatrice FTIP1, pour *FT Interacting Protein* ou «protéine interagissant avec FT». Difficile de faire plus simple.

→ TOUJOURS ACCÉLÈRE : LES GLACIERS ANTARCTIQUES AUSSI

Les impacts de l'humanité sur les glaciers qui débouchent dans les mers entourant le continent blanc et ralentissent ainsi leur avancée. Robin Bell expliquait cela dans un article discutant de l'effet lubrifiant de l'eau circulant sous les calottes de glace (voir «L'eau, une menace pour les calottes polaires» *Pour la Science*, mai 2008, http://bit.ly/PLS367_Bell). Or Hamish Pritchard, du Service de recherche antarctique britannique (*British Antarctic Survey*), et de collègues européens et américains révèlent que c'est surtout la fonte de la base des banquises qui, en les amincissant, facilite leur fragmentation et, de ce fait, minimise, voire annihile, leur rôle d'étalement pour les glaciers (*Nature*, 26 avril 2012). Pour ce faire, les chercheurs ont mesuré par radiométrie laser satellitaire l'épaisseur des banquises et modélisé les névés qui les surmontent afin d'établir une carte de l'amincissement des banquises autour de l'Antarctique. Il en ressort que les glaciers débouchant dans la mer accélèrent avec l'amincissement. Cela prouve que l'épaisseur des banquises est le principal paramètre de contrôle de la vitesse avec laquelle les écoulements de glace antarctiques viennent alimenter la montée des eaux océaniques. Les chercheurs ont remarqué que c'est surtout aux endroits où le courant circumpolaire atteint la banquise que l'amincissement de la glace est le plus important.



principaux tournois professionnels japonais depuis 1941, auxquelles ils ont ajouté pour comparaison 4 000 parties d'amateurs. Il apparaît que, dans ces parties hautement tactiques, les fréquences des coups choisis par les joueurs respectent la loi dite de Zipf. Remarquée initialement sur la répétition des mots, cette loi empirique stipule que les fréquences d'apparition des coups sont inversement proportionnelles à leur rang dans un classement par fréquence d'apparition décroissantes.

Les chercheurs ont ensuite étudié les différentes «matrices d'adjacence» utilisées en théorie des réseaux pour définir des «graphes pondérés», c'est-à-dire des séquences d'états du réseau dont les liens entre nœuds successifs sont caractérisés par des probabilités. Ces dernières sont liées aux «vecteurs propres» des matrices d'adjacence, qui diffèrent d'un tournoi à l'autre et entre les joueurs professionnels et amateurs, mais qui peuvent être groupés afin de caractériser des types de stratégies. Les deux physiciens sont persuadés qu'en poussant plus loin l'étude de la distribution de ces vecteurs propres, on pourra concevoir un simulateur capable de battre les meilleurs professionnels. À suivre...

→ NOUVELLE SIMULATION DU GO

On ne peut pas bien simuler le jeu de go, mais les techniques probabilistes changent la donne, expliquait Sylvain Gelly dans un article où il nous présentait l'approche MoGo fondée sur la méthode de Monte-Carlo (voir «L'ordinateur, champion de go?», *Pour la Science*, avril 2007, http://bit.ly/PLS354_Gelly). Pour leur part, Bertrand Georgeot, de l'Université de Toulouse, et Olivier Giraud, de l'Université Paris-Sud, viennent d'appliquer au go la théorie des réseaux (*Europhysics Letters*, 13 mars 2012). Pour cela, ces physiciens et théoriciens ont modélisé le jeu en le réduisant à ses phénomènes locaux. Ils ont défini une «position centrale» consistant en une intersection entourée de ses huit

Les plaquettes, nœuds du réseau associé au go, sont constituées par une position centrale entourée de ses huit voisines (en bleu).

voisines, lesquelles peuvent être soit vides, soit occupées par une pierre (blanche ou noire). Les symétries de position ou de couleur réduisent le nombre des 6 561 plaquettes possibles *a priori* à 1 107 plaquettes non équivalentes. Ces dernières constituent les nœuds d'un réseau associé au go, dont les liens sont définis par la configuration des arêtes. Il restait aux chercheurs à analyser les évolutions possibles du réseau et à repérer celles qui sont favorables.

B. Georgeot et O. Giraud ont pour cela exploité les 865 parties jouées dans les prin-

1972 • 2012
les PUG ont **40** ans !

Édition limitée
spéciale anniversaire

Préface de Boris Cyrulnik

PETIT TRAITÉ



de manipulation

À L'USAGE DES
HONNÊTES GENS

Robert-Vincent Joule • Jean-Léon Beauvois

300 000 EXEMPLAIRES VENDUS
NOUVELLE ÉDITION AUGMENTÉE • SÉRIE LIMITÉE

« Comment amène-t-on autrui
à faire ce qu'on voudrait le voir
faire ? La solution se trouve dans
cette introduction aux techniques
de la manipulation... »

Le Monde

« La manipulation est observée
sous tous les angles scientifiques,
puis disséquée dans toutes
ses utilisations pratiques...
Tonique en tous cas. »

Challenges

ISBN 978-2-7061-1736-7 — 24 €



Presses universitaires de Grenoble
5, place Robert-Schuman - BP 1549
38025 Grenoble CEDEX 1
Tel. 04 76 29 43 09 / Fax. 04 76 44 64 31
pug@pug.fr / www.pug.fr

En librairie
le 15 mai
2012

POINT DE VUE

Tempêtes solaires : comment s'y préparer ?

L'activité du Soleil est mal connue. Nous devons mettre en commun les connaissances acquises. Alors seulement serons-nous capables de faire des prévisions fiables et de nous préparer au mieux aux « accès de fièvre » de notre étoile.

Jean LIEFENSTEN

Le Soleil est un astre moins placide qu'on ne le pensait jusqu'en 1995. À la date à laquelle plusieurs instruments du satellite SOHO ont commencé à le scruter. Il est agité de soubresauts qui donnent lieu à de spectaculaires éjections de matière (éruptions ou éjections de masse coronale). Son rayonnement varie, en particulier dans l'ultraviolet, et ces variations sont dues aux fluctuations, dont la cause est mal connue, de son champ magnétique.

Les buffées de particules émises lors de ces soubresauts peuvent perturber les satellites et tout le secteur spatial, les télécommunications, les systèmes de géolocalisation, les réseaux d'électricité, etc. Prévoir l'activité solaire pour en minimiser les dommages représente des enjeux industriels qui se chiffrent en milliards d'euros.

Le dernier minimum solaire, en 2010, a duré plus longtemps que prévu, et le début du cycle actuel d'activité ne ressemble pas à ce qui avait été observé au cours des dernières décennies. En fait, si l'on sait que l'activité solaire présente des cycles de 10 à 12 ans, d'autres de 200 ans environ, et d'autres encore plus longs, mais moins bien connus, nous ignorons presque tout de l'activité de notre étoile, puisque nous n'avons que 400 années d'observation directe de son activité sur 4,6 milliards d'années de sa vie, et l'ère spatiale n'a commencé que dans les années 1960. Cette absence de connaissances fiables donne lieu à des supputations qui vont de la diminution simple de l'activité solaire à des éruptions cata-

strophiques, ou, dans les projecteurs médiatiques, vers la « météorologie de l'espace ».

Lorsque cette jeune discipline a émergé, en partie sous l'impulsion de l'astrophysicien français Pierre Lantos (1942-2007), le Plan américain de météorologie de l'espace l'a officiellement définie comme l'étude des « éjections sur le Soleil et dans le vent solaire, la magnétosphère, l'ionosphère et la thermosphère pouvant influencer les performances et la fiabilité des systèmes technologiques spatiaux et terrestres, et au sol, et mettre en danger la vie ou la santé humaine ».

LA MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE
entre dans une phase de maturité
qui nécessite plus de mesures,
de dialogues et de modèles fiables.

Cette rhétorique catastrophiste a été rapidement reprise par la NASA, puis par l'ensemble des agences spatiales et, partant, par la presse mondiale. Aux États-Unis, elle a conduit à une escalade verbale, où l'on n'hésitait plus à envisager des « tsunamis solaires ». La position des Européens fut plus modérée. Les astrophysiciens des 23 nationalités réunies au premier Groupe européen de météorologie de l'espace que j'ai eu la chance d'organiser en 2003 avaient tous connu la guerre. Et leurs craintes de mourir d'une éruption solaire passaient bien après celle de périr d'une bombe, d'un tremblement de terre ou d'une attaque armée. Il nous fallait donc proposer notre propre définition de la météorologie de l'espace.

Ce fut après quatre années de vifs débats. « La météorologie de l'espace est la discipline qui traite de l'état physique et phénoménologique des environnements spatiaux naturels. Au moyen de l'observation, la surveillance, l'analyse et la modélisation, elle vise à plusieurs objectifs : d'une part, comprendre et prévoir l'état du Soleil, des environnements interplanétaires et planétaires, et des perturbations qui les affectent, et de les soit d'origine solaire ou terrestre ; d'autre part, analyser en temps réel ou prévoir les éventuels impacts sur les systèmes biologiques et technologiques. » Cette définition fut adoptée par l'Agence spatiale européenne (ESA) et la Commission européenne.

Notre premier objectif est d'étudier l'activité du Soleil. Le deuxième est d'élaborer des modèles fiables permettant de prévoir les éruptions solaires, et plutôt que de mentionner les dangers comme le font les astronomes américains, nous avons préféré évoquer les impacts sur les systèmes biologiques et techniques.

Les grands défis de la météorologie de l'espace pour les années à venir sont d'ordre organisationnel et scientifique. L'ESA a piloté le lancement européen de météorologie de l'espace dans les années 1990. Mais la météo de l'espace ne se réduit pas au secteur spatial. Au début, il y avait en 2003 quatre objectifs : un Centre européen de prévision, une rencontre annuelle internationale, un portail grand public et une revue scientifique.

La Belgique s'est particulièrement investie, avec une volonté constante de collaboration, et c'est aujourd'hui à Bruxelles que le

Centre européen est implanté. Il donne des prévisions solaires et géomagnétiques d'une qualité équivalente à celles de l'agence américaine NOAA. La rencontre internationale, qui se tient dans diverses villes belges, réunit chaque année opérateurs, industriels, agences spatiales et scientifiques. Le portail www.spaceweather.eu offre des informations dans plusieurs langues de l'Union. Enfin, en 2011, avec Anna Behlaki, nous avons lancé le *Journal of Space Weather and Space Climate*, en accès libre sur Internet. Aujourd'hui, le réseau existe et grandit rapidement, mais il nous faut maîtriser cette croissance et, pour ce, obtenir un soutien pérenne des gouvernements, des agences spatiales et des industriels concernés.

Reste une difficulté de taille : nous devons améliorer nos connaissances scientifiques sur l'activité du Soleil. Aucune équipe n'a été

capable de prévoir ni la durée ni l'amplitude du dernier minimum solaire et, lors de la dernière rencontre de la Société européenne de géosciences qui s'est tenue à Vienne en avril, les avis divergeaient sur la date et l'ampleur du prochain maximum.

Pourquoi est-ce si important de mieux connaître l'activité solaire ? Parce que si nous pouvons prévoir les éruptions violentes, leur composition et l'énergie des particules qui les composent, nous serons capables de minimiser les risques tant pour les hommes que pour les instruments. Ainsi, dès à présent, quand on sait qu'une émission importante va avoir lieu, on prévient, par exemple, les compagnies aériennes qui, dès lors, peuvent dérouter un avion qui serait concerné, afin de

minimiser l'exposition des passagers, mais surtout des personnels navigants qui sont régulièrement soumis aux particules cosmiques. Le lancement d'une fusée peut être reporté de quelques heures pour éviter la bouffée attendue de particules cosmiques, qui risqueraient d'endommager l'électronique embarquée. Les satellites les plus exposés peuvent être programmés de la Terre pour adopter un mode dit de sauvegarde : de cette façon, le satellite cesse d'émettre, évitant d'émettre des informations erronées.

La météorologie de l'espace entre dans une phase de maturité dont tout catastrophisme est exclu. Elle nécessite plus de mesures de toutes sortes, de dialogues entre les partenaires concernés.

Jean-Luc LESTER, chercheur à l'IPAG, Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble.

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

ÉCONOMIE

Che forte l'Italia !

Mario Monti mène diverses réformes au pas de charge. Pourtant, selon le dicton, « Chi va piano, va sano e va lontano ». L'avenir dira s'il ira vraiment loin...

Alain TRUNOY

L'Italie revient à la mode, au moins chez les dirigeants libéraux qui jaloussent les réformes menées au pas de charge par Mario Monti. La cure de rigueur, la réforme des retraites, les libéralisations de l'économie, l'intensification de la lutte contre la fraude fiscale et la prochaine réforme du marché du travail, bientôt débattue au Parlement, le tout en un peu moins de quatre mois. En novembre 2011, l'Italie inquiétait l'aréopage des cercles dirigeants européens et les marchés financiers tant elle semblait devenue vulnérable aux attaques spéculatives nourries par un possible défaut de la Grèce sur sa dette publique. Les taux sur les marchés financiers auxquels elle refinancerait sa dette

dépassaient sept pour cent par an, faisant craindre le pire.

Et pourtant, il faut se garder de se tromper de diagnostic à propos de l'économie italienne. Son problème n'est pas tant sa dette

que sa croissance, voire sa décroissance. La dette publique rapportée au PIB représente aux alentours de 120 pour cent, et les trimestres de croissance nulle ou négative se succèdent. La croissance moyenne de 2002 à 2011 du PIB italien s'est établie à 0,26 pour cent par an, celles de la France et de l'Allemagne au voisinage de 1,1 pour cent sur la même période. La feuille de route de Mario Monti, à son arrivée au pouvoir, était claire : remettre l'économie italienne sur un sentier de croissance, notamment pour payer la dette.

La croissance économique est un phénomène complexe, et même si beaucoup a été écrit depuis Joseph Schumpeter (1883-1950), le premier économiste à avoir posé une explication, la faible croissance



appartient aux maladies chroniques, les plus difficiles à soigner en économie comme en médecine. Comment expliquer la perte de dynamisme de l'économie italienne ?

D'abord par une démographie stagnante, qui n'assure pas le renouvellement des générations. Le taux de fécondité italien est l'un des plus faibles du monde occidental. Beaucoup pointent l'absence de crèches ou un système de garde des enfants défaillant, et la difficulté à louer un logement. Les logements sociaux sont moins nombreux qu'en France. L'insertion des jeunes sur le marché du travail y est très difficile : près d'un tiers des jeunes âgés de 15 à 24 ans est au chômage, alors que le taux de chômage pour l'ensemble de la population n'est pas plus élevé que dans les autres pays européens. Or vitalité démographique et économique semblent aller de pair à long terme.

L'industrie italienne, la seconde de la zone euro après celle de l'Allemagne et devant celle de la France, a toujours constitué une des forces de l'économie italienne. Pour l'habillement, la chaussure, l'électro-

ménager, les matériaux de construction qui sont tous des secteurs traditionnels, la hausse de l'euro par rapport au dollar a handicapé la compétitivité, d'autant que l'Italie a connu une hausse des prix à la consommation plus forte d'environ un demi-point par an par rapport à celle de l'Allemagne depuis la création de la monnaie unique.

Cette hausse témoigne d'une des principales faiblesses de l'économie italienne, celle du secteur des services et, en particulier, l'absence de concurrence intérieure qui se traduit par des gains de productivité inexistant, des phénomènes d'entente ou de collusion entre producteurs. La hausse des prix dans le secteur des services, largement prépondérant dans les économies des pays développés, handicapé à un double titre l'économie italienne. D'une part, l'industrie est tout naturellement un client du secteur des services, d'où une facture élevée en services qui se répercute sur le prix de revient de ses produits à l'export. D'autre part, le consommateur italien voit son pouvoir d'achat amputé par la hausse des prix.

Dans l'arsenal des mesures adoptées par le gouvernement de Mario Monti, si l'on exclut celles qui comportent des économies pour le budget de l'État ou de la Sécurité sociale ou qui visent à mieux faire rentrer les impôts, seules deux réformes sont porteuses d'une croissance plus élevée à terme. La première élargit l'accès aux professions du secteur des services – pharmacies, taxis, stations-service, avocats, notaires. La seconde consiste à réformer le marché du travail en cherchant à en finir avec un dualisme où les travailleurs bien protégés, notamment du risque de licenciement dans les grandes entreprises, coexistent avec des travailleurs sans droits dans un secteur souvent informel. Les jeunes Italiens ont sans doute beaucoup à gagner d'un changement de système, mais la libéralisation du marché du travail va se heurter à une forte résistance syndicale et politique. ■

Alain TRANNOY est directeur d'études à l'École des hautes études en sciences sociales, EHESS, à Marseille.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les berges végétales : écologiques et économiques

Après « sous les pavés, la plage », dira-t-on « sous l'acier, les plantes » ?

Dans les canaux, on remplace peu à peu les berges d'acier par des berges végétales

Christelle FIORINA

Murs couverts de plantes qui isolent du milieu extérieur et créent des corridors écologiques, stations d'épuration où des roseaux assainissent les eaux usées... les ouvrages de génie écologique sont nombreux et variés. Ce domaine consiste à réaliser divers aménagements à l'aide de végétaux. Au début des années 1980, il connaît un essor important

depuis vingt ans, sous l'impulsion des politiques de préservation de l'environnement et de la biodiversité. À mesure que les résultats d'expérience s'accumulent, une filière opérationnelle émerge. L'une des branches les plus développées est le génie végétal, fondé sur l'exploitation des plantes. À l'origine, l'objectif était de rendre leurs caractéristiques naturelles à des milieux anthropisés, tels que les ruisseaux et des cours d'eau enfer-

més dans les canalisations, ou de restaurer des milieux dégradés, telles les zones humides (la moitié de ces dernières avaient disparu en France).

Aujourd'hui, le génie végétal s'applique avec succès à des infrastructures artificielles de transport, tels les canaux : les racines des plantes stabilisent leurs berges de façon pérenne, ce qui présente de multiples intérêts. Dans le Nord-Est, les établissements publics

Voies navigables de France (VNF), qui y gère environ 800 kilomètres de canaux, expérimente des techniques végétales depuis une vingtaine d'années. Quelque 25 kilomètres de berges y sont déjà « végétalisées ». À l'échelle nationale, de plus en plus de berges végétales devraient être installées à la place des aménagements usuels, majoritairement fondés sur des plaques d'acier verticales (et, dans une moindre mesure, sur du béton).

LE GÉNIE VÉGÉTAL ÉMET SEPT FOIS

moins de dioxyde de carbone que les techniques usuelles d'aménagement des berges.

Les espèces végétales sont d'abord sélectionnées en fonction de la faculté des racines à former des réseaux étendus et ancrés profondément dans le sol, paramètre clef pour la stabilisation. Ainsi, dans le Nord-Est de la France, on utilise couramment la baldingère faux roseau, la grande glycérie et des espèces du genre *Carex*. Pour améliorer la biodiversité et l'aspect visuel, on complète souvent cette sélection par un mélange d'iris des marais, de soucis d'eau et de salicaires.

Outre les plantes, le génie végétal fait appel à divers matériaux naturels pour aménager une berge : il utilise par exemple des grillages en fibres de noix de coco pour la stabiliser en attendant que les plantes poussent ; ces fibres naturelles se dégradent ensuite plus vite que des fibres synthétiques. Une large palette de techniques est disponible. On peut par exemple créer une plage végétale de faible pente, superposer des rondins de bois séparés par de la terre où des graines sont plantées. Cela permet de traiter des profils très différents, avec des hauteurs d'eau et des largeurs de berge variées.

Le génie végétal a un bilan carbone bien meilleur que les techniques usuelles : on estime qu'il émet sept fois moins de dioxyde de carbone pour aménager une berge que les techniques fondées sur des plaques d'acier verticales (de l'extraction des matériaux jusqu'à leur utilisation).

La faible production de dioxyde de carbone n'est pas le seul intérêt écologique de la végétalisation des berges. Celle-ci crée une continuité entre le milieu aquatique et le milieu terrestre, ce qui est particulièrement intéressant pour la constitution des « trames vertes et bleues » (un réseau écologique cohérent, constitué de réservoirs de biodiversité et des corridors qui les relient) décidée lors du Grenelle de l'environnement. En effet, les berges redeviennent des zones qui offrent des espaces d'abri, de nidation et de reproduction pour une faune diversifiée : poissons, batraciens, oiseaux et mammifères d'eau. Ainsi, certaines techniques (celles où une partie non négligeable de la berge est immergée dans l'eau) augmentent la diversité et la quantité de poissons présents : on a même retrouvé dans certains canaux des espèces rares en milieu artificiel, tels la bouvière, le brochet ou le rotengle.

Le génie végétal rapproche donc les caractéristiques physiques et biologiques des berges de canaux de celles des berges naturelles. *In fine*, la berge naturalisée peut produire des services dits écosystémiques, utiles à l'homme : approvisionnement en poisson, régulation (rétention des eaux dans le sol, alimentation des nappes phréatiques, dépollution de l'eau), activités culturelles et de loisir (promenade, découverte de la nature, sensibilisation à l'environnement)... La voie navigable, infrastructure dédiée essentiellement au transport de marchandises et à la plaisance, devient une voie d'eau, c'est-à-dire une infrastructure et un écosystème offrant des services multiples.

Outre ses atouts écologiques, le génie végétal est moins coûteux que les techniques classiques, pour une durabilité égale (à condition que les plantes s'enracinent bien, ce qu'on doit vérifier). Ces procédés sont en développement et alimentent un important travail de recherche et de développement : ils disposent pour cela d'un vaste terrain d'expérimentation.

Christel FIORINA est enseignante à Mines ParisTech et ingénieure en environnement.



→ pourlascience.naturejobs.com

Nouveau service d'offres d'emplois scientifiques sur

POUR LA SCIENCE

en partenariat avec **naturejobs**



- Chaque semaine, plus de 8000 offres d'emploi dans le secteur des sciences.
- En un clic la sélection des postes à pourvoir en France et dans les pays francophones ou voisins.
- Une équipe Naturejobs spécialisée, au service des recruteurs francophones.

Contact : Muriel Lestringuez
e-mail : m.lestringuez@nature.com
tél. : +44 20 7843 4994

POUR LA SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

VRAI OU FAUX

Les footballeurs trichent-ils toujours ?

Non. Une étude montre que les simulations sont assez peu fréquentes.

Cependant, d'autres types de triche existent. Il reste à les quantifier...

Christian BROMBERGER

Les hauts faits de tricherie appartiennent à la légende du football. Citons par exemple le but décisif marqué de la main par Diego Maradona, lors de la rencontre entre l'Argentine et l'Angleterre, à la coupe du monde de 1986. Si la triche semble « payer » au football, c'est que les moyens de la détecter ne sont pas totalement fiables. En un clin d'œil, l'arbitre, aidé par ses assistants, doit détecter la main et décider si elle est volontaire – seul cas où elle est sanctionnable. Lors d'une chute, il doit juger si elle est simulée, provoquée par un tacle régulier (une gâssade un pied en avant touchant d'abord le ballon), ou la conséquence d'une faute. La décision laisse une large place à l'interprétation et à la discussion. La tentation de la simulation est grande et les supporters ne manquent pas d'incriminer la tricherie des autres quand les leurs ont été battus sur un score serré.

Les footballeurs trichent-ils aussi souvent qu'on le dit ? Non, selon une étude publiée en 2011 et menée par Gwendolyn David et ses collègues de l'Université du Queensland, en Australie. Les chercheurs, des biologistes spécialisés dans la tricherie au sein du monde animal, ont visionné 60 matchs de six grands championnats européens et analysé 2 803 chutes de joueurs. Ils classent ces chutes en différentes catégories : chute volontaire sans contact avec l'adversaire (simulation), chute provoquée par un tacle, chute involontaire sans contact (due par exemple à une perte d'équilibre), etc. Ils analysent aussi leur fréquence en fonction du score, de l'endroit du terrain et de la position plus ou moins éloignée de l'arbitre.

Leurs conclusions sont sans équivoque. Dans leur échantillon, seules 169 chutes sont des plongeons, où la faute est manifestement simulée, soit seulement six pour cent des cas ; aucun des simulateurs n'a été récompensé par un coup franc. Dans 94 pour cent des cas, même si elle est parfois exagérée, la chute est provoquée par un tacle régulier ou par une faute. Ainsi, les plongeons intentionnels sont minoritaires.

Pour rendre compte de ce résultat, les chercheurs recourent à la théorie des jeux, qui analyse les stratégies opti-

auraient un coût bien supérieur à leur bénéfice.

Au résultat, les tricheries sont plus nombreuses à proximité des buts adverses et lors où les deux équipes sont à égalité. Là encore, la théorie des jeux l'explique : à coût égal, le bénéfice est plus élevé dans ces deux cas.

Si les simulations restent assez rares, la tricherie s'exprime aussi par des maillots tirés, des joueurs déséquilibrés de façon déloyale, des fautes de main, etc. Il serait intéressant d'étendre l'étude à ces différentes tricheries, particulièrement fréquentes dans le football, et plus généralement dans les sports collectifs. Dans les autres sports, les athlètes ne sont soumis qu'à des « juges » d'une implacable rigueur : des instruments mesurant les distances au centimètre près pour les épreuves de saut et de lancer, le chronomètre, précis au millième de seconde pour les courses... La tricherie y est impossible pendant la compétition et se limite aux phases antérieures, par le biais du dopage et de la corruption.

Bien que moins importante qu'on ne le croit souvent, la tricherie reste présente dans le football. Elle participe sans doute à la fascination exercée par ce sport. Il exalte l' mérite individuel, la performance, l'acquisition d'un statut par le travail et la solidarité, mais il révèle également le rôle notable de la chance, de la tricherie et d'une justice – celle de l'arbitre – parfois discutable. Le football illustre parfaitement les ressorts contradictoires de la réussite aujourd'hui.



AU FOOTBALL, les simulations sont assez rares par rapport aux chutes provoquées par un tacle régulier ou par une faute.

males dans une compétition (ludique, sportive, politique, économique...). Ils attribuent un coût aux tricheries, correspondant au risque d'être sanctionné pour simulation (par une faute ou un carton jaune) : ce coût augmente avec le nombre de tricheries, car l'arbitre se méfie de plus en plus. Le bénéfice est la probabilité d'obtenir un coup franc utile. Des tricheries trop fréquentes

Christian BROMBERGER est ethnologue à l'Université de Provence.



Depuis quinze ans, **Le Monde** soutient les jeunes chercheurs et la recherche. Lancé en 1997, le Prix *Le Monde* de la recherche universitaire entend valoriser les travaux de jeunes chercheurs francophones susceptibles d'influencer notre environnement scientifique, économique, social et/ou artistique.

Cette année, à l'issue du concours présidé par le philosophe Edgar Morin pour les sciences humaines et sociales et par l'académicien Pierre Léna pour les sciences exactes, ce prix offrira la possibilité à cinq docteurs récemment diplômés en sciences humaines de publier leur thèse aux Presses universitaires de France et à cinq docteurs en sciences exactes de publier un résumé de leurs travaux dans *Pour la Science* et dans un ouvrage publié aux Éditions Le Pommier.

Par ailleurs le quotidien *Le Monde* présentera l'ensemble de ces thèses.

15^e
édition

PRIX *Le Monde* DE LA RECHERCHE UNIVERSITAIRE

Pour sa quinzième édition, le Prix *Le Monde* de la recherche universitaire est ouvert aux :

Docteurs en sciences humaines et sociales ayant soutenu leur thèse entre le 31 octobre 2010 et le 31 décembre 2011. Les inscriptions seront enregistrées jusqu'au 15 juin 2012.

Docteurs en sciences de la matière ou de la vie, fondamentales ou appliquées ayant soutenu leur thèse entre le 31 octobre 2010 et le 31 décembre 2011. Les inscriptions seront enregistrées jusqu'au 15 juin 2012.

Cette année, une attention particulière sera portée aux travaux de recherche universitaire innovants, qui proposeront des solutions concrètes de nature à simplifier la vie quotidienne du grand public.

A l'un d'eux, sera décernée une « mention spéciale Google ».

RENSEIGNEMENTS COMPLEMENTAIRES ET INSCRIPTIONS

Site internet : www.lemonde.fr/prix-recherche/

Email : prixrecherche@lemonde.fr

Le Monde

Google

**FONDATION
CREDIT COOPERATIF**
FONDATION D'ENTREPRISE



Fondation Charles Léopold Mayer
pour le Progrès de l'Homme



Pour réagir aux articles : courrier@pouirlascience.fr
ou directement sur les pages correspondantes du site www.pouirlascience.fr

✓ CHAUFFAGE LE RÉACTEUR !

L'article *En route vers Mars* (*Pour la Science* n° 414, avril 2012, <http://bit.ly/marspls>), imagine que le vaisseau spatial sera alimenté par un réacteur nucléaire d'une puissance de plusieurs mégawatts. Les technologies utilisées au sol sont-elles adaptables dans l'espace ?

Ne faut-il pas une surface gigantesque pour évacuer la chaleur ?

Yves Quémer

→ RÉPONSE D'ÉLISA CLIQUET, ingénieure au CNES

L'efficacité d'un réacteur peut aller de quelques pour cent (conversion thermoélectrique) à environ 30 pour cent (turbine). Dans l'espace, faute de source froide, le reste de la chaleur doit être dissipé via des panneaux radiants.

Pour que la dissipation soit efficace, la température des panneaux doit varier de 450 à 800 kelvins selon les concepts. En conséquence, pour un rendement raisonnable, le cœur du réacteur monte à 1 000 kelvins ou plus. Le fluide caloporteur doit ainsi être un métal liquide ou un gaz neutre, et non plus de l'eau.

La surface radiante requise pour dissiper une puissance de quelques mégawatts peut atteindre des milliers de mètres carrés. Cela reste toutefois très inférieur à la surface de panneaux solaires livrant une puissance équivalente. Développer un système capable de fournir une puissance de l'ordre du mégawatt en orbite n'est pas une mince affaire...

✓ TRÈS HAUTE FISCALITÉ

L'article *La fiscalité sur les très hauts revenus* d'Alain Trannoy (*Pour la Science* n° 415, mai 2012, <http://bit.ly/revpls>) suscite la question suivante : comment expliquer qu'une taxation à 90 pour cent des gens les plus riches ne soit pas appliquée aux États-Unis après la grande crise de 1929 ?

Fabienne Milet

Combien de contribuables seraient touchés en France par l'imposition à 75 pour cent discutée par Alain Trannoy ? Cette mesure aurait-elle un réel impact en termes de revenus pour l'État ?

Alexandre Ganet

→ RÉPONSE D'ALAIN TRANNOY

Une partie de la réponse à la question sur l'imposition à 90 pour cent des riches aux États-Unis est en fait déjà contenue dans le dernier paragraphe de mon article, qui introduit l'argument d'une économie ouverte.

Dans les années 1930, les États-Unis étaient une économie fermée. Dans une telle économie, le seul argument contre des taux marginaux élevés tient à ce que les personnes taxées pourraient réduire l'effort fourni, afin de réduire leur taux marginal. Toutefois, les études indiquent que les personnes qui se situent à de très hauts niveaux de revenu ont peu réduit leur effort. Dès lors, le revenu taxable et, par conséquent, le revenu national diminuent peu. Cela a contribué au redressement des États-Unis après la crise de 1929 (voir C. et D. Romer, *The incentive effects of marginal tax rates in the interwar period*, 2012, article disponible sur le Web).

Quant au nombre de contribuables qui seraient concernés par une imposition à 75 pour cent en France, les estimations sont très difficiles. Les chercheurs n'ont en effet pas accès à ce niveau de détail aux sources fiscales, ce qui nuit à la précision de leurs travaux dans ce domaine.

L'estimation que je tire d'un dernier rapport du Conseil des prélèvements obligatoires est que la mesure toucherait 3 000 contribuables. Elle ne rapporte pas beaucoup de recettes fiscales supplémentaires : les estimations donnent moins de 500 millions d'euros. Mais tout dépendra de la réaction des rentiers français (ceux qui vivent uniquement des revenus de leur capital) concernés. Réagissent-ils massivement à une telle imposition par un exil fiscal ? Le caractère temporaire ou permanent de la mesure est l'un des paramètres qui interviendront (pour plus de détails sur les questions de fiscalité, voir par exemple A. Trannoy, *On entend dire qu'il faut une révolution fiscale*, Les Échos/Eyrolles, 2012).

✓ LES PUNAISES DANS LE LIT

Quelques compléments d'information sont apportés à l'article *Le retour de la punaise des lits* (*Pour la Science* n° 414, avril 2012, <http://bit.ly/punlits>) par Dominique Pluot-Siawalt, attachée honoraire au Muséum national d'histoire naturelle (Paris) :

→ En France, la présence des punaises des lits n'est pas encore aussi alarmante qu'aux États-Unis ou en Australie. Mais tout laisse penser qu'elle est en train de le devenir, surtout en région méditerranéenne où la punaise des lits trouve un climat chaud qui lui convient. Comme le montre la recrudescence des demandes d'identification (au Muséum) depuis une dizaine d'années, les logements de particuliers, les hôtels, les trains de nuit sont de plus en plus touchés.

L'un des facteurs qui contribuent à la recrudescence des punaises des lits (après l'abandon du DDT ou du Lindane) est la disparition des savoirs populaires sur ce parasite que tout le monde connaissait avant-guerre. Il y a baisse de vigilance, on ne sait plus reconnaître la présence de punaises et on ne traite pas à temps les lieux infestés (au Muséum, je vois arriver des gens qui sont infestés depuis des mois et des mois).

Par ailleurs, une bonne partie des professionnels de la désinsectisation ont aussi perdu leurs compétences et leurs savoirs. La punaise des lits est très difficile à éradiquer et elle l'a toujours été beaucoup plus que n'importe quel autre insecte. Ces difficultés sont dues à sa biologie particulière et il est nécessaire de suivre un certain nombre de procédures et d'étapes pour en venir à bout.

Par exemple, lorsqu'une chambre est infestée, c'est tout l'appartement qu'il faut traiter en réalité, y compris les appartements voisins, voire tout l'immeuble... Et il faut répéter le traitement plusieurs fois, car les œufs ne sont pas atteints : on doit attendre l'éclosion des larves. Se débarrasser d'une infestation n'est ainsi pas à la portée des simples particuliers. Il est malheureusement nécessaire de faire appel à des professionnels, ce qui est coûteux.

Regardez toujours plus loin avec

POUR LA SCIENCE



Offre liberté

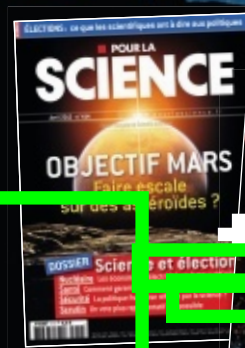
19 € par trimestre

+ En cadeau le CD *Einstein et les révolutions quantiques*

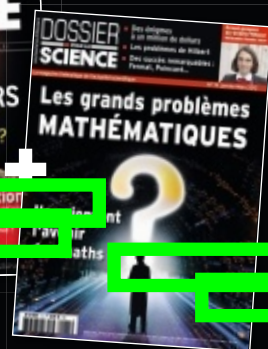
De la relativité à la physique quantique, Alain Aspect - physicien français et membre de l'Académie des Sciences - raconte deux révolutions

scientifiques majeures qui continuent de bouleverser notre vision du monde.

CD audio de 75 minutes - Collection « L'Académie raconte les sciences » édité par De Vive Voix - Mars 2012 - Valeur : 9,90 €.



12 n°/an



4 n°/an

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Service Abonnements Pour la Science • Libre réponse 90382 • 75281 Paris cedex 06

POUR LA SCIENCE

1 ☐ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science* + *Dossier Pour la Science* au prix de 19 €/trimestre ou 76 € pour 1 an.**

En cadeau, je reçois le CD *Einstein et les révolutions quantiques*. Je bénéficie également des versions numériques sur www.pourlascience.fr

2 **J'indique mes coordonnées :**

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ (facultatif) : _____

Je souhaite recevoir la newsletter *Pour la Science* à l'adresse e-mail suivante (à remplir en majuscule) :

_____ @ _____

3 **Je choisis mon mode de règlement :**

☐ Je règle en douceur 19 €/trimestre*. Je remplis la grille d'autorisation de prélèvement ci-dessous en joignant impérativement 1 RIB.

*Valable en France métropolitaine uniquement.

Autorisation de prélèvement automatique. J'autorise l'établissement teneur de mon compte à prélever le montant des abonnements trimestriels présentés par *Pour la Science*. Je vous demande de faire apparaître les prélèvements sur mes relevés de compte habituels. Je m'adresserai directement à *Pour la Science* pour tout ce qui concerne le fonctionnement de mon abonnement.

Titulaire du compte à débiter

Nom, Prénom : _____

N° : _____

CP : _____ Ville : _____

Établissement pour le compte à débiter

Établissement : _____

N° : _____ Rue : _____

CP : _____ Ville : _____

Compte à débiter

Établissement : _____ Code guichet : _____ N° de compte : _____ Clé RIB : _____

Date et signature (obligatoire)

Organisme créancier

Pour la Science

2 rue Farou - 75006 Paris

N° national d'émetteur : 426900

☐ Je préfère régler mon abonnement en une seule fois 76 € (+ frais de port en sus pour l'étranger : Europe 16 € - autres pays 35 €)

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

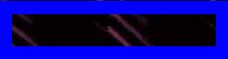
☐ par carte bancaire

N° : _____ Expire fin : _____ Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) : _____

Signature obligatoire : _____

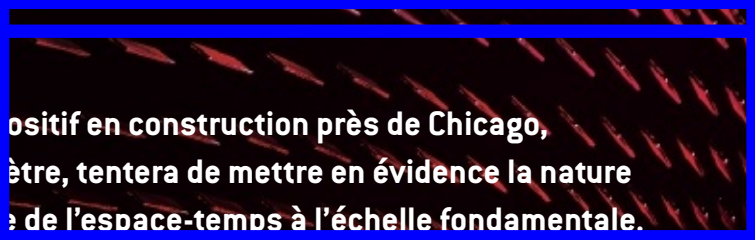


Physique



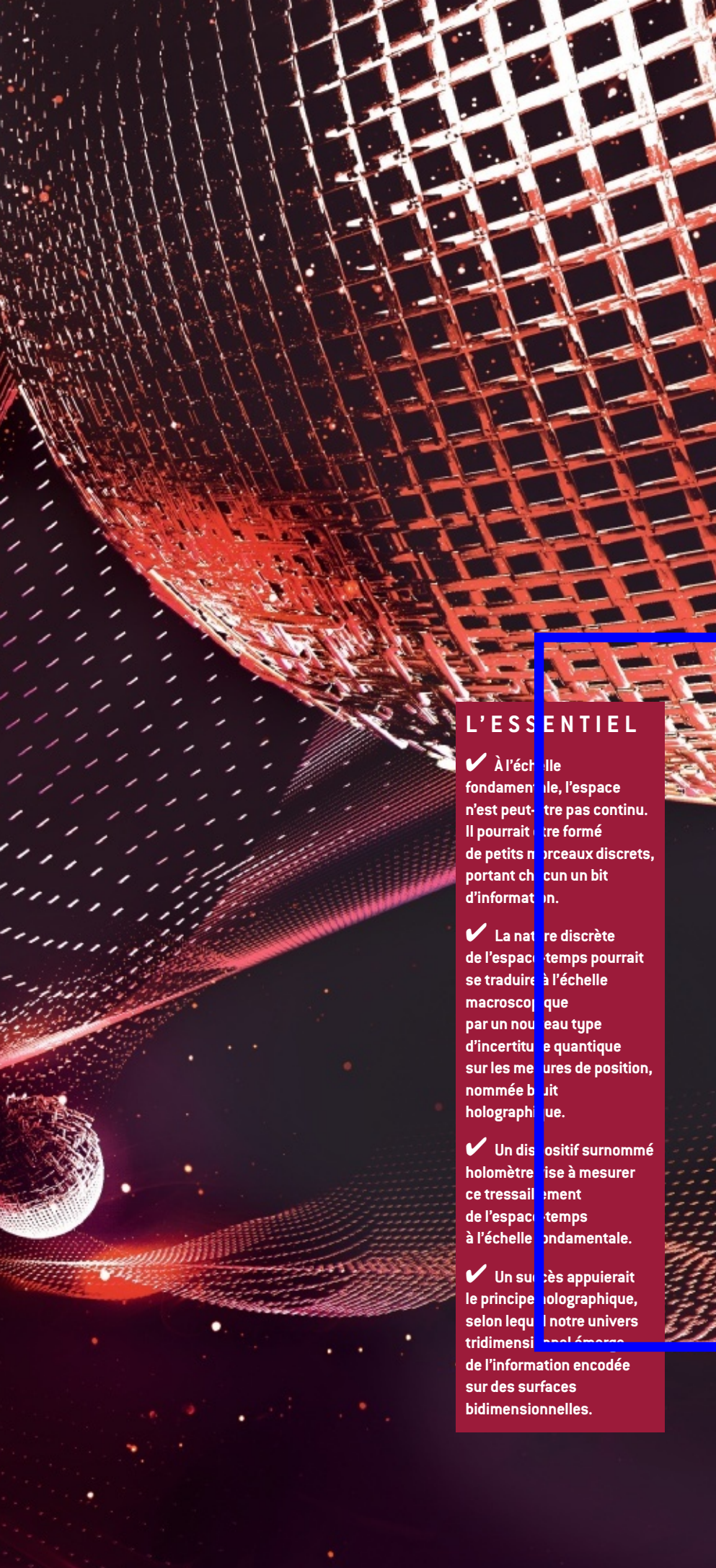
Michael Moyer

L'ESPACE ? est-il discret ?



Un dispositif en construction près de Chicago, l'holomètre, tentera de mettre en évidence la nature discrète de l'espace-temps à l'échelle fondamentale.

Si l'expérience est couronnée de succès, les lois de la physique seraient à réécrire.



L'ESSENTIEL

✓ À l'échelle fondamentale, l'espace n'est peut-être pas continu. Il pourrait être formé de petits morceaux discrets, portant chacun un bit d'information.

✓ La nature discrète de l'espace-temps pourrait se traduire à l'échelle macroscopique par un nouveau type d'incertitude quantique sur les mesures de position, nommée bruit holographique.

✓ Un dispositif surnommé holomètre vise à mesurer ce tressaillement de l'espace-temps à l'échelle fondamentale.

✓ Un succès appuierait le principe holographique, selon lequel notre univers tridimensionnel émerge de l'information encodée sur des surfaces bidimensionnelles.

Le monde est-il fluide ? C'est une métaphore. Pour Craig Hogan, physicien des particules à l'Université de Chicago et directeur du Centre d'astroparticules du Fermilab, dans l'Illinois, si nous parvenions à observer les plus petites subdivisions de l'espace et du temps, nous découvririons un univers en perpétuelle effervescence, un incessant bourdonnement de fluctuations. Cette agitation n'est pas celle de particules qui apparaissent et disparaissent, ni d'autres types de « mousses quantiques » imaginés jusqu'ici. Ce bruit serait la marque d'un espace discontinu qui, au lieu d'être une toile de fond bien lisse à la danse des particules, serait au contraire constitué de petits morceaux irréductibles : un univers discret.

À la plus petite échelle possible, l'échelle de Planck (10^{-35} mètre), les deux piliers de la physique du XX^e siècle, la théorie quantique et la relativité générale, semblent irréconciliables. C'est à cette même échelle que des physiciens ont développé depuis quelques décennies une description de l'Univers en termes d'information, c'est-à-dire de bits – des 0 et des 1. Selon cette théorie dite holographique, c'est l'information, et non pas la matière et l'énergie, qui constitue l'essence même de l'Univers. De cette information émerge le cosmos.

C. Hogan a entrepris de tester si la nature discrète de l'espace est une réalité. Il a ainsi conçu une expérience pour explorer l'agitation intrinsèque de l'espace aux échelles les plus fondamentales.

Son dispositif, surnommé holomètre, met en jeu un interféromètre extrêmement précis installé sur le campus du Fermilab. Il tient dans un simple bunker et un tube épais comme le poing, où voyageront des faisceaux laser, court sur 40 mètres entre le bunker et une remise.

Il n'est pas certain que cette expérience livre des résultats satisfaisants. C'est une plongée dans l'inconnu, dont la modestie de moyens tranche avec ceux de la physique des particules actuelle.

Les scientifiques ont développé dans les années 1960 et 1970 un édifice théorique nommé aujourd'hui modèle standard de la physique des particules. Au cours des décennies suivantes, des expériences l'ont testé toujours plus en détail. Les théoriciens proposent une idée, par exemple le boson de Higgs, qui se concrétise en un modèle ; le modèle livre des prédictions, et

l'expérience les contredit ou les confirme. La théorie précède l'expérience.

Si ce schéma existe, c'est pour une bonne raison : les expériences de physique des particules coûtent horriblement cher. Le LHC, ou Grand collisionneur de hadrons du CERN, près de Genève, a coûté des milliards d'euros et son exploitation occupe des milliers de physiciens du monde entier. C'est la machine la plus complexe jamais construite. Les scientifiques se demandent si la prochaine génération de collisionneurs de particules (avec des énergies, des dimensions et des coûts plus élevés) ne sera pas simplement trop coûteuse pour l'humanité.

Au Fermilab, l'équipe rassemblée par C. Hogan comprend une vingtaine de membres, dont des conseillers qui ne participent pas aux travaux au jour le jour sur le site. C. Hogan est à l'origine un physicien théoricien, peu habitué aux caprices des pompes à vide et des lasers à solides. C'est pourquoi il a nommé responsable Alan Chao, un ingénieur expérimenté, ancien directeur du département de physique du Fermilab. En 2011, le projet a

reçu un financement de deux millions de dollars, à peine le prix d'un seul des aimants superconducteurs du LHC!

Une version moderne de l'expérience de Michelson et Morley

Si l'holomètre est si bon marché, c'est que, pour l'essentiel, il s'agit d'une version moderne de la célèbre expérience de Michelson et Morley, qui a détruit la vision qu'on avait de l'espace et du temps à la fin du XIX^e siècle. Les physiciens savaient alors que la lumière se comporte comme une onde. Or, depuis les vaguelettes à la surface d'un mare jusqu'au son qui se propage dans l'air, toutes les ondes semblaient partager certaines caractéristiques. En particulier, elles avaient toujours besoin d'un substrat physique pour assurer leur propagation. La lumière étant une onde, il

devait exister un milieu de propagation, l'éther. Les scientifiques l'appelaient l'éther

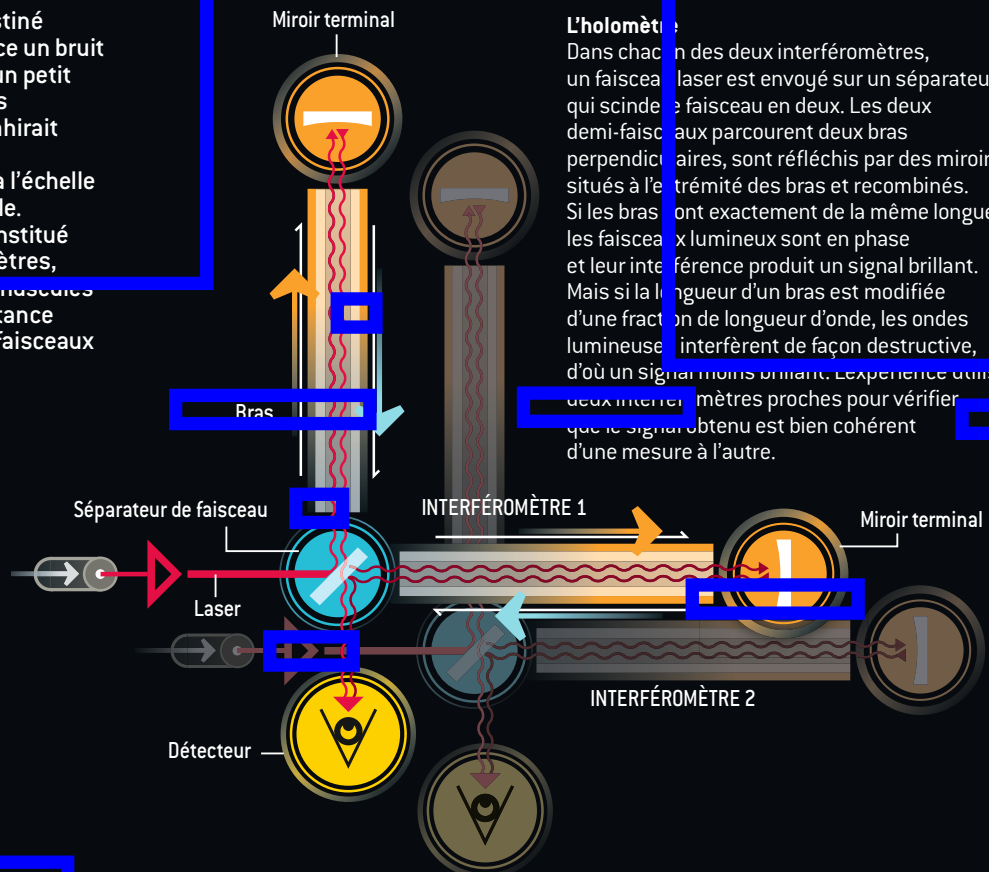
En 1887, Albert Michelson et Edward Morley mettent au point une expérience destinée à mettre en évidence l'éther. La lumière d'une source se propage sur toute la longueur de deux bras perpendiculaires, est réfléchie par des miroirs placés à leurs extrémités, et se recombine au point de départ. Si le temps de parcours diffère d'un bras à l'autre, ne serait-ce que d'une fraction de microseconde, des interférences destructives se produisent et la lumière recombinée est moins brillante. Michelson et Morley ont scruté les interférences lumineuses de leur dispositif durant plusieurs mois. Selon la direction du mouvement de la Terre autour du Soleil, le mouvement relatif par rapport à l'éther devait modifier le temps de trajet de la lumière dans l'un ou l'autre bras.

Mais l'expérience n'a rien mesuré de tel et imposa la conclusion que la lumière se propage à la même vitesse, quelle que soit la direction et quel que soit le mouvement de la source ou de l'observateur. Quelque temps plus tard, Einstein s'em-

UN MICROSCOPE POUR ACCÉDER À LA LONGUEUR DE PLANCK

L'holomètre est destiné à mettre en évidence un bruit dit holographique, un petit tressaillement dans les positions qui trahirait la nature discrète de l'espace-temps à l'échelle la plus fondamentale. Le dispositif est constitué de deux interféromètres, qui détectent de minuscules variations de la distance parcourue par des faisceaux laser.

Dans chacun des deux interféromètres, un faisceau laser est envoyé sur un séparateur, qui scinde le faisceau en deux. Les deux demi-faisceaux parcourent deux bras perpendiculaires, sont réfléchis par des miroirs situés à l'extrémité des bras et recombinaison. Si les bras ont exactement de la même longueur, les faisceaux lumineux sont en phase et leur interférence produit un signal brillant. Mais si la longueur d'un bras est modifiée d'une fraction de longueur d'onde, les ondes lumineuses interfèrent de façon destructive, d'où un signal moins brillant. L'expérience utilise deux interféromètres proches pour vérifier que le signal obtenu est bien cohérent d'une mesure à l'autre.



développer la théorie de la relativité restreinte, puis générale.

L'expérience de C. Hogan s'appuie elle aussi sur des interféromètres, plus élaborés, pour tenter de mettre en évidence une hypothétique toile de fond invisible de l'espace-temps, qui rappelle l'idée de l'éther. En utilisant deux interféromètres placés l'un à côté de l'autre, il compte sonder l'échelle de Planck, la plus petite échelle de l'Univers, celle où l'information existe sous forme de bits.

Sonder l'échelle de Planck

La longueur de Planck n'est pas simplement petite, c'est la plus petite. Une masse regroupée dans un volume plus petit correspondrait à moins d'un quantum d'énergie, ce qui est impossible.

L'échelle de Planck est plus que celle où la théorie de la relativité générale et la théorie quantique achoppent. Depuis quelques dizaines d'années, un débat sur la nature des trous noirs a fait émerger

une compréhension nouvelle de l'échelle de Planck. L'essence de l'Univers serait l'information, dont les bits constitutifs seraient encodés dans la trame de l'espace-temps à l'échelle de Planck.

Selon un principe fondamental de la physique, l'information ne disparaît jamais. Elle peut changer de forme, être brouillée, mélangée, mais elle subsiste à un niveau fondamental. Même lorsque ce magazine aura été réduit en pâte à l'usine de recyclage, l'information qui y est imprimée sera réorganisée sous une autre forme, mais pas effacée. En théorie, ce processus peut être inversé – les mots et les images peuvent être reconstitués à partir de la pâte à papier – même si, en pratique, cela semble impossible. Les physiciens racontent cela par le fait que l'entropie, une quantité qui mesure le nombre de configurations microscopiques compatibles avec l'état macroscopique d'un système, ne peut que croître avec le temps.

Tous les physiciens sont d'accord sur ce principe, sauf dans un cas particulier : qu'advient-il de l'information engloutie

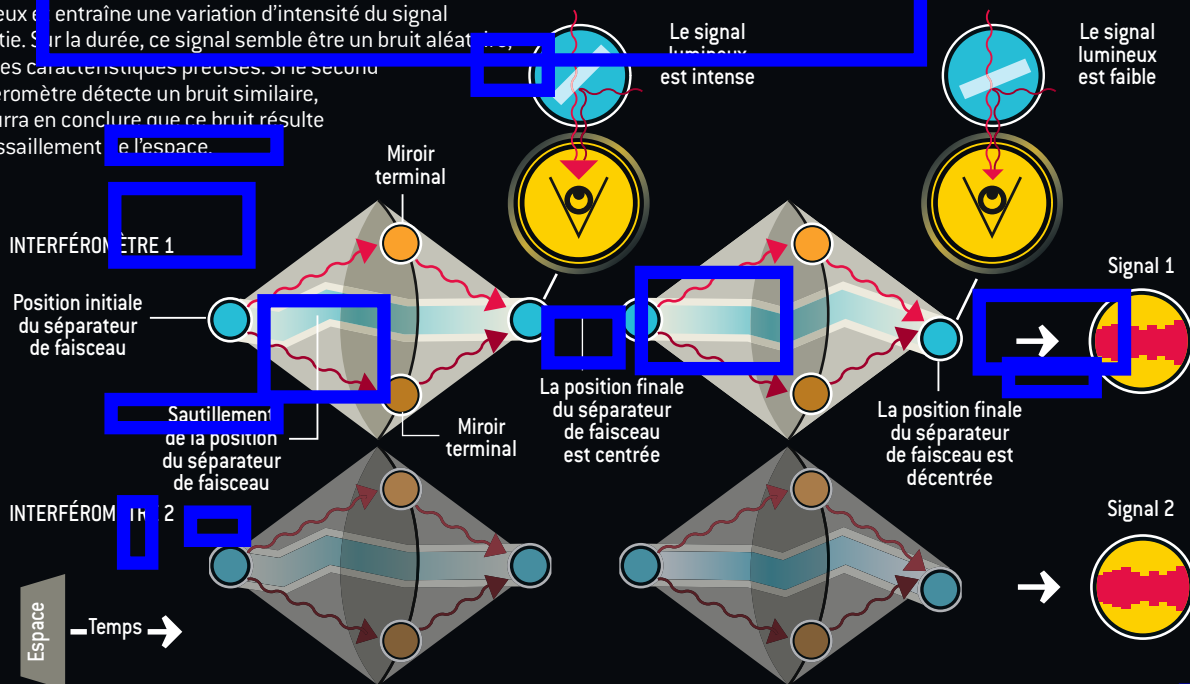
par un trou noir ? En effet, rien, pas même la lumière ne peut émerger d'un trou noir. Pire, Stephen Hawking a montré en 1975 que les trous noirs ne sont pas immuables : ils perdent de l'énergie en émettant un rayonnement thermique, « s'évaporant » ainsi lentement jusqu'à disparaître. L'information qu'ils renferment est alors perdue à jamais (le rayonnement de Hawking est dépourvu de structure et ne peut restituer l'information contenue dans le trou noir). En résumé, selon S. Hawking, l'information qui pénètre dans un trou noir y est irrémédiablement piégée.

Pour Leonard Susskind, de l'Université Stanford, et Gerard 't Hooft, de l'Université d'Utrecht aux Pays-Bas, ce paradoxe de la disparition de l'information soulévé par S. Hawking était tout simplement inacceptable.

Dans les décennies suivantes, ce désaccord a conduit les physiciens à développer une théorie aujourd'hui nommée principe holographique. Selon ce principe, quand un objet tombe dans un trou noir, la matière est définitivement perdue, mais

Le tressaillement de l'espace

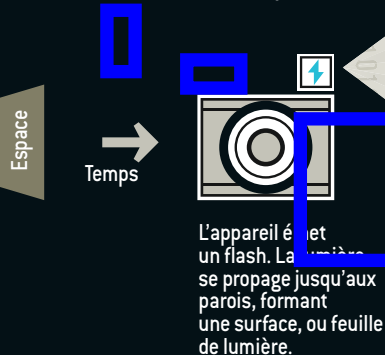
Si l'espace est discret à l'échelle de Planck, cela devrait se manifester à l'échelle macroscopique par un infime et rapide sautilllement de la position des objets à l'échelle macroscopique. En particulier, le séparateur de faisceau devrait vibrer de façon aléatoire. Ainsi, durant le temps que met la lumière pour parcourir les bras et revenir, le séparateur de faisceau aura légèrement bougé, ce qui décale les phases des faisceaux lumineux et entraîne une variation d'intensité du signal de sortie. Sur la durée, ce signal semble être un bruit aléatoire, mais avec des caractéristiques précises. Si le second interféromètre détecte un bruit similaire, on pourra en conclure que ce bruit résulte du tressaillement de l'espace.



LE PRINCIPE HOLOGRAPHIQUE

D'après le principe holographique, le monde tridimensionnel émerge de l'information contenue sur des surfaces bidimensionnelles. Raphael Bousso a proposé en 1999 une interprétation en termes de « feuille de lumière ». Imaginons une pomme qui tombe dans une pièce. Des surfaces qui se propagent vers l'intérieur d'un volume à la vitesse de la lumière contiennent toute l'information sur les objets présents dans ce volume et les processus physiques qui s'y déroulent.

On peut visualiser ces feuilles de lumière comme le flash lumineux d'un appareil photo qui fait « apparaître » un objet en train de tomber dans une pièce.



Murs de la pièce

La lumière se réfléchit sur les murs et reconverge en un point.

Feuille de lumière

L'information codée sur ces feuilles de lumière décrit toute la physique qui se déroule dans la pièce (par exemple, la chute d'une pomme) à l'instant où la lumière est réfléchie par les murs.

L'AUTEUR

Michael MOYER est rédacteur au magazine *Scientific American*.

l'information qu'elle porte est, d'une façon ou d'une autre, sauvegardée à la surface du trou noir – plus précisément à l'horizon des événements, la surface virtuelle de non-retour, en deçà de laquelle la lumière ne peut plus revenir. Ainsi, l'horizon des événements se double d'un grand livre d'archives. L'information n'est pas perdue.

La nature de ces bits d'information, ou degré de liberté, reste cependant inconnue à ce jour faute d'une théorie complète de la gravitation quantique.

Cette conception selon laquelle l'information comprise dans une région d'espace dépend de sa surface et non de son volume est plus qu'une astuce pour résoudre le paradoxe de l'information des trous noirs. L. Susskind et G. 't Hooft ont étendu l'idée à l'univers entier en 1993. Selon le principe holographique, à l'instar d'un hologramme qui enregistre une image en trois dimensions sur une pellicule à deux dimensions, toute l'information sur l'univers tridimensionnel qui nous entoure serait encodée sur des surfaces bidimensionnelles (qui restent à déterminer).

De plus, il a été montré que ce principe est valable pour certains modèles d'espace-temps. Le physicien argentin Juan Maldacena a par exemple établi en 1997 qu'une théorie des supercordes dans un espace-temps dit anti-de Sitter à cinq dimensions est équivalente à une théorie quantique des champs sur la frontière de cet espace-temps.

En 1999 et 2000, Raphael Bousso, maintenant à l'Université de Californie à Ber-

Des bits d'information à la surface des trous noirs

Dans les années 1980, Raphael Sorkin, de l'Université de Syracuse, a montré que l'entropie fondamentale d'un trou noir vaut un quart de la surface de son horizon mesurée en unités égales à l'aire de Planck. En d'autres termes, sur l'horizon du trou noir, chaque petit carré dont le côté mesure deux longueurs de Planck contient un bit d'information. Ainsi, un trou noir de un centimètre de diamètre – ou plutôt, sa surface – renferme 10⁶⁶ bits d'information. Il s'agit de l'entropie fondamentale, qui mesure les états microscopiques de l'espace à l'échelle la plus fondamentale. La

keley, a proposé une interprétation du principe holographique qui permet de l'étendre à un grand nombre de situations. Imaginez une surface concave, comme la face interne d'une sphère, tapissée d'une infinité de flashes. Ceux-ci se déclenchent tous en même temps, formant un front d'onde lumineux qui se propage vers le centre. C'est sur cette surface à deux dimensions, la « feuille de lumière », que toute l'information concernant les objets situés à l'intérieur de la sphère et rencontrés par le front d'onde est stockée (voir l'encadré page ci-contre).

L'espace-temps est un sous-produit des quantités d'information

Cette feuille de lumière, d'après le principe holographique, contient l'information sur la position des particules et des forces s'exerçant sur elles à l'intérieur de la sphère. Mais il ne s'agit pas d'une simple pellicule qui enregistre ce qui se passe dans la région tridimensionnelle d'univers. Au contraire, la feuille de lumière vient en premier. Elle projette sur le monde l'information contenue à sa surface, faisant apparaître tout l'univers tridimensionnel que nous voyons. L'espace-temps, ainsi que la matière et les forces qui s'exercent sur elle, est un sous-produit de la surface holographique encodant des bits d'information.

Ainsi, le principe holographique laisse entrevoir une connexion profonde entre l'information, l'espace-temps, la matière et la gravité. Il pourrait en ce sens révéler la direction à suivre pour développer la théorie quantique complète de la gravitation, qui engloberait la relativité et la physique quantique.

Même si le principe holographique est correct, des questions subsistent. Sous quelle forme l'information est-elle codée ? Comment est-elle traitée pour faire émerger l'Univers que nous observons ? Pour certains physiciens, l'Univers est un ordinateur qui traite l'information pour faire apparaître ce que nous percevons comme la réalité physique. Mais cet ordinateur est pour le moment une boîte noire.

C. Hogan ne cherche pas à résoudre ces questions complexes. Il propose seulement de déterminer si, au niveau fondamental, l'espace se décompose en unités d'information. Dans la plupart des théories,

prétations, l'espace-temps qui émerge de la description holographique de l'Univers est intrinsèquement quantique, c'est-à-dire qu'il est discret et fluctuant.

Plus précisément, dans cet espace-temps quantique émergent, la position d'un objet n'est pas précisément définie. Il ne s'agit pas d'une incertitude quantique usuelle, selon laquelle on ne peut connaître simultanément la position et la vitesse exactes d'une particule, mais d'une incertitude intrinsèque : la notion classique de point, avec des coordonnées bien définies, n'a pas de sens.

À l'espace, en se fondant sur la « géométrie non commutative » du mathématicien français Alain Connes, C. Hogan a proposé un nouveau concept de position. Selon cette idée, la position d'un objet est mesurée par des opérateurs qui ne commutent pas ; en d'autres termes, une mesure de la position selon une direction x , puis selon une direction y , donne un résultat différent d'une mesure effectuée selon la direction y , puis selon la direction x . Il existerait ainsi une incertitude fondamentale, de nature géométrique, sur les positions dans l'espace-temps qui émerge de la description holographique du monde.

Ainsi à l'échelle de Planck, l'espace-temps est agité d'un sautillerment permanent, la position précise d'un objet fluctuant sans cesse. L'Univers n'est pas similaire à l'éther classique, transparent, cristallin : sa texture est mouvante.

Mais comment descendre au niveau de cette texture et la mettre en évidence ? L'échelle de Planck est si petite que l'atteindre dans un accélérateur de particules – en concentrant une énergie colossale dans un volume infinitésimal – est tout simplement impossible à l'échelle terrestre. L'hologramme de C. Hogan a pour objectif d'attaquer par le flanc la longueur de Planck.

L'interféromètre de Michelson et Morley tenta de mesurer une minuscule variation de la vitesse de la lumière due au mouvement de la Terre autour du Soleil en comparant deux faisceaux lumineux ayant parcouru une distance raisonnablement grande. En effet, le retard dû à une hypothétique variation de la vitesse de propagation se cumule avec la distance et devient mesurable.

Il en est de même avec l'incertitude quantique sur la position proposée par C. Hogan. Elle induit une erreur à l'échelle



UNE COLLECTION D'ENTRETIENS AUDIO ORIGINAUX À TÉLÉCHARGER



EINSTEIN ET LES RÉVOLUTIONS QUANTIQUES
Le révolution quantique du début du XXe siècle se prolonge de nos jours avec une deuxième révolution qui repose sur le concept étrange d'intrication.
Alain Aspect, Professeur à l'Institut d'Optique et membre de l'Académie des sciences
MP3 - 75 minutes **9,90€**



LE CERVEAU
Une exploration détaillée et fascinante de l'organe le plus complexe du corps humain par un des plus grands neurologues français.
Yves Agli, Neurologue, membre de l'Académie des sciences
MP3 - 57 minutes **9,90€**

TÉLÉCHARGEZ LES NOUVEAUTÉS DE LA FABRIQUE SCIENCES SUR DEVIVEVOIX.FR

SCIENCES & MUSIQUES D'AVANT-GARDE



QUADRIVUM RADIO

Découvrez le programme de podcasts de la web radio Quadrivium en partenariat avec le magazine Pour la Science. Pénétrez dans les plus grands laboratoires pour écouter la parole des chercheurs.

- Biologie

Nicolas Gompel
Institut de biologie du développement de Marseille-Luminy
L'expression des gènes dans le cadre de l'évolution
- Physique

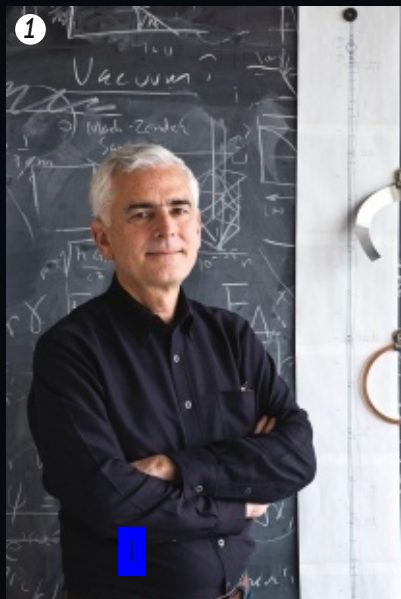
Stéphane Mazouffre
Laboratoire Icar à Orléans
Au cœur d'un propulseur à plasma
- Physique

Simone Speziale
Centre de physique théorique de Luminy
Gravité quantique
- Biologie

Jonathan Ewbank
Centre d'immunologie de Marseille-Luminy
Immunologie

www.quadrivumradio.com

1



CRAIG HOGAN (1), directeur du Centre d'astrophysique des particules du Fermilab, dans son bureau. L'holomètre est en construction à un kilomètre de là. Les bras des deux interféromètres, où voyageront les faisceaux laser, sont des tubes de 40 mètres de long où régnera un vide poussé (2). Une première paire de bras est abritée dans un bunker autrefois utilisé pour des faisceaux de particules ; l'autre paire part vers l'extérieur, avec à son extrémité une remise où se trouvent des miroirs et l'optique nécessaire à la focalisation (3). Un équipement optique de précision est utilisé pour focaliser et aligner les faisceaux (4).

2



3



4



de Planck sur la position dans la direction transverse au trajet d'un rayon lumineux. Cette erreur se cumule le long du trajet sur des distances macroscopiques. Si elle ne change rien à la propagation de la lumière dans le vide, elle se manifeste là où la lumière interagit avec la matière. L'effet apparaît alors comme une sorte de déplacement perpendiculaire à la direction de propagation par rapport à la position classique, avec une échelle de temps et une amplitude qui dépendent de la taille du système.

C. Hogan a calculé que le signal résultant de cette incertitude sur l'espace-temps, ou bruit holographique, doit avoir une amplitude de l'ordre de l'attomètre (10^{-18} mètre) sur une échelle de temps de quelques dizaines de microsecondes. C'est très petit, mais en principe détectable par les interféromètres les plus précis.

Les tressaitements de l'espace-temps à la loupe

L'holomètre est ainsi construit sur un principe similaire à celui de l'expérience de Michelson et Morley, à ceci près que ces derniers ne disposaient pas de lasers et d'électronique de précision. Un faisceau laser est envoyé sur un séparateur de faisceau qui divise la lumière en deux et envoie chaque demi-faisceau le long de deux bras de 40 mètres de long disposés perpendiculairement. Chaque faisceau est réfléchi par un miroir à l'extrémité du bras correspondant, revient au séparateur et se recombine avec le faisceau ayant parcouru l'autre bras. Mais au lieu de mesurer les variations de temps de trajet dues au mouvement de la Terre, le dispositif mesure les éventuelles variations de longueur de la trajectoire des faisceaux, dues aux petits décalages sur les positions, décalages eux-mêmes imputables à la trame quantique de l'espace-temps.

Plus précisément, on montre que le bruit holographique entraîne de petites incertitudes sur la position du séparateur de faisceau (mais pas sur les miroirs terminaux des bras). Pendant le temps qu'il faut à la lumière pour effectuer un aller-retour dans les bras, le séparateur de faisceau subit de petites variations de sa position, de sorte que le trajet des faisceaux réfléchis est légèrement allongé ou raccourci, d'où un déphasage et une

variation du signal de sortie (voir l'encadré page 29).

Cependant, de nombreux facteurs, tels que le vrombissement d'un moteur non loin du bâtiment ou un vent fort qui secoue ce dernier, peuvent entraîner un déplacement du séparateur de faisceau. Comment être sûr que le bruit mesuré est bien la manifestation de la trame discrète de l'espace-temps ?

Un problème similaire s'est posé dans une autre expérience d'interférométrie, LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*). LIGO vise à mettre en évidence les ondes gravitationnelles, des perturbations de la trame de l'espace-temps prédites par la relativité générale, qui résultent du mouvement des astres massifs. LIGO comporte deux gigantesques interféromètres jumeaux, l'un situé en Louisiane et l'autre dans l'État de Washington. Malheureusement, les ondes gravitationnelles font vibrer le dispositif à la même fréquence que d'autres phénomènes banals, tel le passage de camions à proximité. Les détecteurs doivent donc être soigneusement isolés.

Heureusement pour C. Hogan, les déplacements qu'il cherche à mettre en évidence sont beaucoup plus rapides : l'espace est supposé tressaillir à une fréquence caractéristique de l'ordre du mégahertz. Dès lors, les seules sources d'interférences possibles sont les radios locales émettant à la même fréquence, un signal facilement identifiable. Selon Stephan Meyer, physicien à l'Université de Chicago qui travaille sur l'holomètre, la manifestation d'un signal à cette fréquence confirmera l'existence du bruit holographique.

L'holomètre de C. Hogan va-t-il livrer des résultats incontestables ? Et si oui, quelle interprétation théorique les physiciens pourront-ils en donner ? C. Hogan n'a pas de réponse à ces questions. Mais selon lui, le but du dispositif est de livrer les données étranges que les théoriciens de demain devront expliquer, un peu comme au début du XXI^e siècle, les résultats énigmatiques de certaines expériences ont poussé les théoriciens à inventer la mécanique quantique pour les expliquer. Parfois, pour débloquer une situation théorique, une expérience suffit. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Hogan, *Interferometers as probes of celestial quantum geometry*, <http://arxiv.org/abs/1002.4880v27>, février 2012.

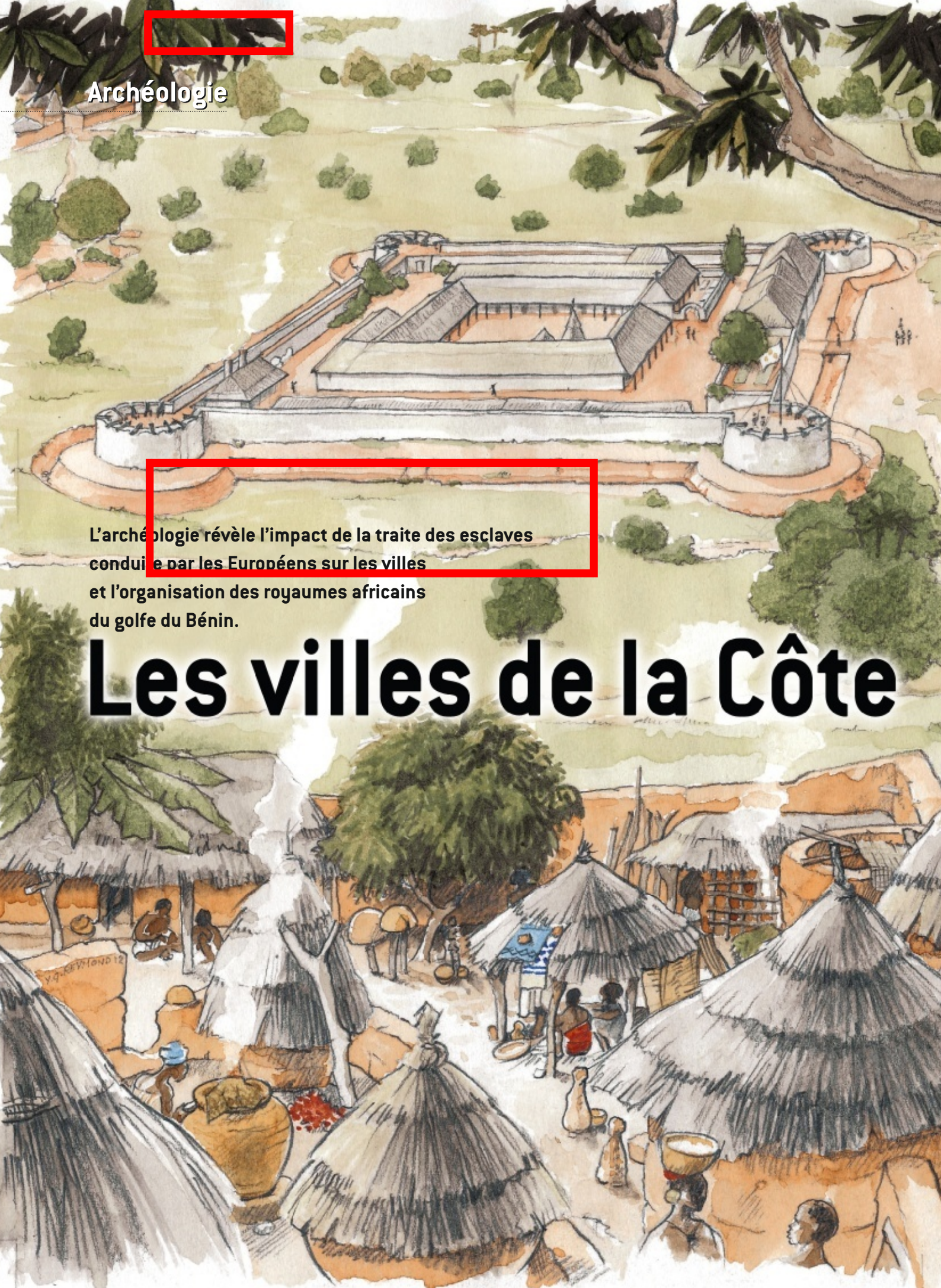
C. Hogan, *Interferometers of holographic quantum geometry*, <http://arxiv.org/abs/0806.0665>, septembre 2008.

L. Smolin, *Des atomes d'espace et de temps*, *Pour la Science* n° 316, février 2004. http://bit.ly/316_smolin

J. Bekenstein, *Univers holographique*, *Pour la Science* n° 313, novembre 2003. http://bit.ly/313_bekenstein

R. Bousso, *Le principe holographique*, *Reviews of Modern Physics*, vol. 74(3), pp. 825-874, 2002. <http://arxiv.org/abs/hep-th/0203101>





Archéologie

L'archéologie révèle l'impact de la traite des esclaves
conduite par les Européens sur les villes
et l'organisation des royaumes africains
du golfe du Bénin.

Les villes de la Côte



des esclaves

Camille Morant

L'ESSENTIEL

- ✓ L'Afrique est peuplée, depuis plus de deux millénaires, par des sociétés urbanisées vivant au sein de royaumes centralisés.
- ✓ Leurs rois se sont mis à échanger des captifs de guerre contre des biens européens pour en tirer prestige et pouvoir.
- ✓ Les archéologues ont montré que cette traite des esclaves a bouleversé plusieurs fois l'ordre politique, l'économie et les villes du Sud du Bénin.

Le paysage communément représenté que les villes africaines soient apparues sous l'influence européenne. Rien n'est plus faux. Comme en Europe, l'urbanisation s'est développée en Afrique au I^{er} millénaire avant notre ère. Pour autant, à partir du XVI^e siècle, la multiplication des contacts avec les Européens a bouleversé les paysages culturels africains. Par cette expression, on désigne les paysages ayant subi des aménagements par l'homme, telles les villes, mais aussi les campagnes les plus souvent bien plus marquées par les activités humaines qu'il n'y paraît. L'étude des paysages culturels est l'objet de l'archéologie dite des paysages. Plutôt que d'étudier jusque dans le dernier détail des sites isolés, les archéologues du paysage examinent des ensembles de structures anthropiques, par exemple la répartition, la forme ou l'importance des villes, le réseau des routes commerciales qui les relie, le maillage d'un territoire, etc.

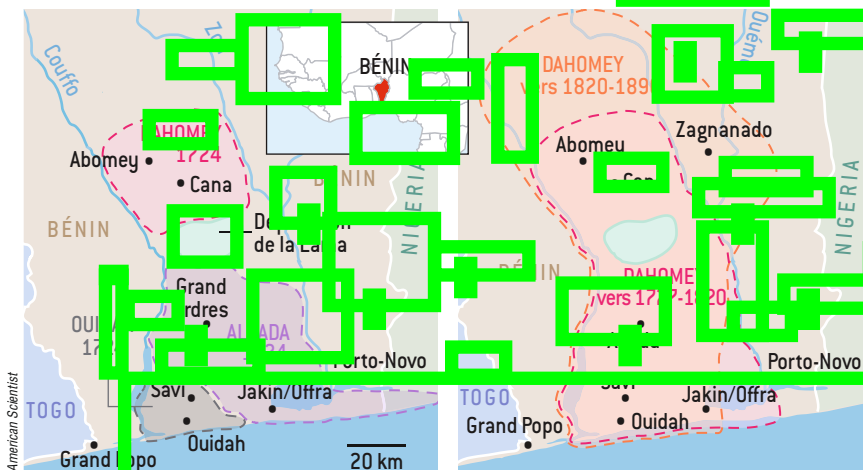
Traite négrière dans le golfe du Bénin

C'est un exercice de ce genre que nous menons sur le territoire de trois anciens royaumes d'Afrique occidentale aux destins liés : les royaumes de Ouidah, d'Allada et du Dahomey. Il révèle que, si dans cette région, la tendance à l'urbanisation a précédé les contacts avec les Européens, la traite des esclaves, c'est-à-dire l'échange de captifs contre des marchandises européennes par les élites royales, a eu un fort impact, enregistré dans le sol, sur l'organisation des sociétés de ce que les négriers nommaient la « Côte des esclaves ».

Ce nom désigne le golfe du Bénin, soit les quelque 300 kilomètres de côte africaine allant de l'embouchure du fleuve Volta, au Ghana, au canal de Lagos, au Nigeria. L'arrière-pays de cette bande côtière englobe le Sud du Ghana, du Togo, du Bénin et du Nigeria occidental. Il correspond à la « trouée du Dahomey », une région côtière où la forêt tropicale humide

1. À L'ÉPOQUE DE LA TRAITE NÉGRIÈRE (du XVI^e au XVIII^e siècle) des agglomérations africaines se sont formées autour des forteresses européennes de la Côte des esclaves. Des échanges avaient lieu dans ces points d'appui pour négriers européens, mais l'essentiel des achats de captifs se faisait dans la capitale du royaume, où le roi exigeait la présence des commerçants afin de les contrôler.

Yves G. Reymond



2. LES ROYAUMES D'OUIDAH, D'ALLADA, FOIS DU DAHOMEY se sont succédé entre le XVI^e et le XVII^e siècle sur la côte de l'actuel Bénin. Leurs élites royales ont nourri leur prestige et maintenu leur ordre politique par le commerce des esclaves, des captifs razzés par leurs armées chez les voisins.

cède la place à une mosaïque de forêts et de savanes, plus accessible.

De fait, les lagunes côtières et les vallées de la région fournissaient les artères nécessaires aux interactions culturelles. Ce réseau hydrographique coupe une série de hauts plateaux où les températures modérées et l'écoulement des cours d'eau favorisant la propagation de diverses maladies offraient des conditions favorables au peuplement. C'est là que des communautés de paysans et de pêcheurs ont développé les marchés et la centralisation politique, fondement des civilisations rencontrées par les Européens à l'époque de la traite, du milieu du XVI^e à la fin du XIX^e siècle.

Isaac Adeagbo Akinjogbin, de l'Université Obafemi Awolowo au Nigeria, estime qu'une quinzaine de royaumes ont existé dans la trouée du Dahomey pendant la traite. Selon les sources ethnographiques et historiques, ils ont été fondés par des chefs de guerre yorubas, qui ont migré vers la trouée du Dahomey depuis les centres urbains d'Ilé-Ifé, d'Oyo et plus tard de Kétou. Surtout présents sur le territoire du Nigeria, les Yorubas sont un grand groupe ethnique d'Afrique de l'Ouest qui, très tôt, a développé une civilisation urbaine. Ces chefs ont assujéti les communautés rencontrées et fondé des royaumes centralisés, qui sont à l'origine des deux principales sources d'esclaves identifiées dans les textes historiques de l'époque de la traite : le royaume d'Allada et son vassal le royaume de Ouidah, que l'on nomme parfois le royaume de Savi (voir la figure 2).

Fondé au XVI^e siècle, le royaume d'Allada dominait ce qui est aujourd'hui le Sud du Bénin. Il doit son expansion aux échanges, par le portage piroguier, avec les principaux royaumes de la zone forestière, notamment avec celui du Bénin (Sud du Nigeria). Au milieu du XVI^e siècle, les Portugais y avaient établi une intense activité commerciale au Grand Ardres, sa capitale, où vivaient alors pas moins de 30 000 des quelque 200 000 habitants du royaume. Dans son ouvrage de 1668 *Description de l'Afrique*, l'humaniste néerlandais Olfert Dapper rapporte l'existence de « villes et de villages en grand nombre » dans la campagne environnant le Grand Ardres.

Le royaume d'Ouidah, vassal d'Allada

Au XVII^e siècle, le royaume d'Allada est devenu assez puissant pour obliger ses voisins à lui payer un tribut dans le cadre de grands rituels. Vassal du royaume d'Allada, le royaume de Ouidah est alors très souvent mentionné dans les récits d'expéditions européennes. Peu important durant la plus grande partie du XVII^e siècle, il entre dans l'histoire en 1671, quand les Français fondent un comptoir à Savi, sa capitale. Comme Allada, Ouidah était très peuplée : Savi comptait sans doute 30 000 à 100 000 habitants du royaume. Vers 1734 le marchand d'esclaves et historien anglais Robert Norris le décrit ainsi :

Savi était à cette époque la métropole du royaume, la résidence de son monarque et le siège de son commerce. Elle avait environ qua-

tre milles de circonférence. [...] La ville grouillait de gens, à tel point qu'il était impossible de traverser les rues sans difficulté. Des marchés se tenaient tous les jours, sur lesquels étaient exposées à la vente toutes sortes de marchandises, européennes et africaines, sans compter une abondance de produits alimentaires de tous types. [...] La campagne environnante était embellie par une multitude étonnante de villages, petits et grands, tous enclos d'un mur en terre, bien en vue du voisinage. L'ensemble formait le paysage le plus pittoresque que l'on puisse imaginer, que ne dissimulait aucun mont ni colline.

À Savi, un grand marché pouvait rassembler 10 000 personnes. Les paysans venaient tous les quatre jours (la semaine du marché à Savi et au Grand Ardres pour proposer le sel, les tissus, les paniers, lesalebasses, les poteries qu'ils produisaient. Une certaine diversité caractérisait les communautés rurales dont ils provenaient, mais elles étaient toutes intégrées au sein d'un réseau économique dont les nœuds étaient les centres urbains. Ainsi, villes et groupes ruraux faisaient partie d'un même ensemble où étaient produits et mis en circulation les biens domestiques.

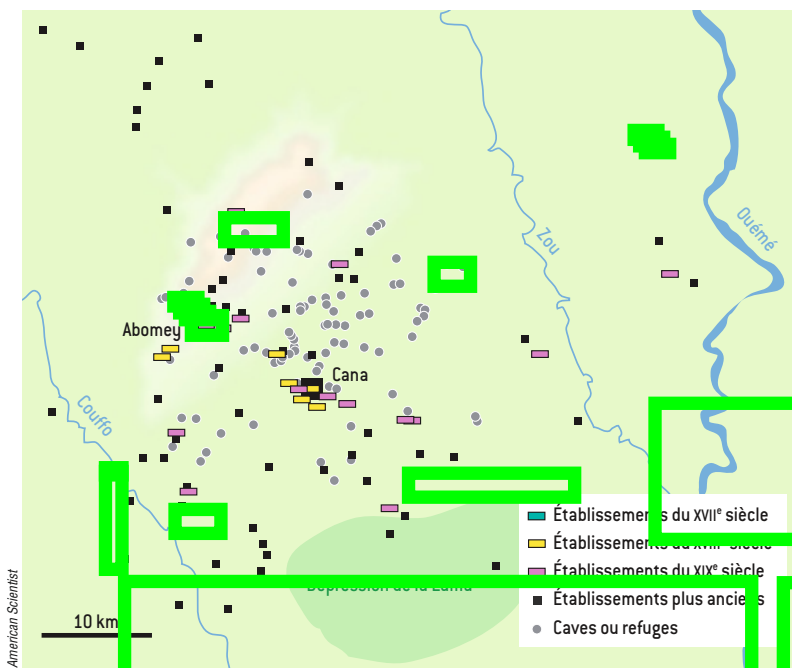
Pour autant, le développement de la traite négrière a progressivement exercé une grande influence sur les échanges entre campagnes et villes le long de la Côte des esclaves. Les captifs, c'est-à-dire les prisonniers faits au cours de razzias contre des voisins plus faibles, sont peu à peu devenus des « articles d'exportation » de premier plan. Dans les années 1680, environ 5 000 captifs par an étaient déportés depuis la Côte des esclaves, chiffre qui atteignit 10 000 durant les deux décennies suivantes. En échange de ces prisonniers, les marchands européens payaient essentiellement en tissus et en cauris, coquillages (*Cypraea moneta*) de l'océan Indien qui servaient de monnaie dans la région. Les textes mentionnent aussi des métaux (barres de fer ou de cuivre), des perles, des fusils et de l'alcool (voir les figures 3 et 7). De fait, nombre de sites archéologiques de la région ont livré des perles, des restes de pipes en argile, des céramiques, des bouteilles d'alcool et divers autres articles.

Les sources historiques suggèrent que certains de ces biens étaient vendus sur les marchés. Il est toutefois clair que c'est avant tout la valeur symbolique de ces marchandises exotiques (aux yeux des Africains!) qui intéressait les rois, parce qu'elle leur conférait pouvoir et prestige. Des récits de

This is a detailed historical map of the University of Leuven, Belgium, dated 1670. The map shows a large, rectangular walled campus. Inside the walls are numerous buildings, including the main university building (Palace), several churches, and smaller courtyards. Outside the walls, there are more buildings, a river (the Dyle), and a large area where many people are depicted walking or standing. The map is labeled with various names in Latin and Dutch, such as 'Palace', 'Church', 'University', and 'Leuven'. The overall style is characteristic of 17th-century cartography, with fine lines and detailed shading.

A photograph showing several archaeological artifacts laid out on a brick surface. The artifacts include a large, dark, rounded pottery bowl in the foreground, a smaller dark bowl or jar in the center, a white ceramic bowl with blue floral patterns in the upper left, and various fragments of pottery and stone. A red vertical bar is visible on the left side of the image.

4. L'HOIMAGE AUX ANCÊTRES ROYAUX, ou *Xwetanu*, représenté par le gouverneur britannique Archibald Dalziel à la fin du XVII^e siècle. Le roi du Dahomey profitait de cette cérémonie annuelle pour affirmer sa puissance: de grandes quantités de richesses étaient offertes, parmi lesquelles des marchandises européennes (qui étaient données) et des captifs (mis à mort). On remarque que des notables européens étaient invités à la cérémonie : du reste, pour justifier l'esclavage, on avançait l'argument que cela valait mieux pour les captifs que le sacrifice...



5. L'ÉVOLUTION DU PLATEAU D'ABOMEY au cours des siècles telle que la révèle l'archéologie du paysage. Le plateau était déjà densément peuplé avant que ne commence la traite négrière, avec laquelle apparaissent, puis se multiplient les concessions royales. Ces dernières se répandent à la campagne au XIX^e siècle. De nombreuses caves creusées dans la latérite ont aussi été retrouvées. On ignore quel était leur usage mais il s'agissait peut-être de caches pour les objets lors de chasses à l'esclave qui, manifestement, avaient lieu sur le plateau d'Abomey aussi...

William and Mary, à Williamsbourg, en Virginie, dans le cadre du Projet archéologique de Savi (Savi Archaeological Project) ont fait beaucoup progresser notre vision du remodelage de l'urbanisation au sein du royaume de Ouidah. K. Kelly a lancé des fouilles à Savi en 1991. Il a d'abord étudié une forte concentration de poteries et d'autres objets au sein d'un cercle de cinq kilomètres de diamètre, soit environ 20 kilomètres carrés : cela correspondait à un important établissement. En son centre, il a localisé une série de profonds fossés entourant une enceinte de 6,5 hectares centrée sur les vestiges d'un vaste complexe palatial. Cette zone était sans doute le lieu où se tenaient les cérémonies publiques à la gloire du roi et de ses ancêtres.

Les commerçants européens étaient obligés de vivre dans l'enceinte royale, dans des compounds construits près du palais. Le roi contrôlait ainsi les marchands européens, qui étaient pour lui non seulement la source d'importantes richesses, mais aussi celle de troubles potentiels. K. Kelly a mis au jour dans le palais royal de grandes quantités de marchandises importées, dont des pipes hollandaises, des porcelaines chinoises, des bouteilles d'alcool et même des tasses hollandaises utilisées pour servir le thé palatial (voir la figure 3). Soulignons que ces objets ont

été découverts dans les zones les plus « publiques » du palais, précisément là où le roi recevait ses hôtes, ce qui indique la contribution importante des biens européens au pouvoir et à l'autorité symboliques de la monarchie de Ouidah.

Poursuivant les recherches de K. Kelly, N. Norman a de son côté exploré en 2005 un cercle de dix kilomètres de diamètre autour de Savi. Il y a noté la répartition de quantités importantes de fragments de poteries et d'autres artefacts, ainsi que les restes de nombreux bâtiments de terre aujourd'hui éboulés. Sur la base de ces observations, il reconstitue une société à trois classes, ce qui corrobore les témoignages historiques selon lesquels la région entourant Savi était très peuplée et qu'outre la capitale, elle comportait des villes de province semi-autonomes de quelques milliers d'habitants, puis des villages de quelques centaines d'habitants.

Comme c'était le cas dans le royaume d'Allada, les sources historiques indiquent que le pouvoir du roi de Ouidah reposait en grande partie sur son habileté à capter les richesses européennes et à les diriger vers les chefs ruraux. Les fouilles menées par N. Norman à la campagne n'ont cependant livré aucun reste de marchandises européennes, ce qui suggère que l'arrière-pays n'était pas intégré dans

le circuit de ces produits de luxe. Si la concentration des richesses européennes dans le palais était source de pouvoir et d'influence pour la monarchie, son absence dans les campagnes entraînait des tensions notables avec les chefs ruraux. On suppose que l'incapacité du roi de Ouidah à cultiver la loyauté de ses élites rurales a vraisemblablement renforcé les luttes entre factions et précipité l'effondrement politique du royaume.

Quand le Nord attaque

De fait au siècle des Lumières, la féroce compétition autour des biens européens a provoqué l'absorption des royaumes de Ouidah et d'Allada par le royaume du Dahomey. Cet ancien client et fournisseur de captifs du royaume d'Allada a bouleversé brusquement le système régional après presque un siècle d'expansion et de consolidation sur l'ensemble du plateau d'Abomey. En 1716, il se rebelle contre Allada et envoie vers le Sud des troupes qui conquièrent Allada en 1724 et Ouidah en 1727, dévastant les deux capitales et une grande partie de leurs campagnes. Débarassé d'Allada, le Dahomey prend le contrôle de la principale route commerciale menant à la côte et institue un État centralisé pendant toute la durée de son règne.

de la traite. Tout au long de cette période, les monarchies dahoméennes se sont démenées sans relâche pour définir les termes du commerce des esclaves, se heurtant souvent à une sérieuse opposition de la part des marchands et des élites des zones côtières. Malgré les luttes de pouvoir au sein de leurs cours, les menaces constantes du royaume voisin d'Oyo au Nigeria et les à-coups du commerce transatlantique, tout au long du XVIII^e siècle, les souverains dahoméens ont renforcé leur contrôle sur la traite.

De grands rites publics

Les historiens ont beaucoup étudié les méthodes employées par les rois dahoméens pour étendre et maintenir leur ordre politique jusqu'à la conquête française de 1894. Ils ont mis en lumière le rôle des institutions militaires et bureaucratiques du Dahomey, ainsi que l'existence de grands rites publics, durant lesquels les richesses acquises grâce à la traite des esclaves étaient montrées et distribuées.

À la suite de l'expansion dahoméenne, les villes de Savi et d'Allada se sont dépeuplées en grande partie, tandis que la population de Ouidah a augmenté à mesure que la ville devenait le principal port de la région, atteignant 30 000 habitants au milieu du XIX^e siècle. Sur le plateau d'Abomey, les fouilles révèlent par ailleurs que les villes dahoméennes sont devenues le centre de toute une série de stratégies rituelles, économiques et politiques destinées à intégrer les populations rurales d'une façon radicalement nouvelle.

Bien que la nature du peuplement pré-dahoméien sur le plateau soit mal connue, il apparaît qu'au XVIII^e siècle, deux cités y prédominaient : Abomey et Cana (voir la figure 6). Abomey, une agglomération établie au tour d'une place de marché et d'une série de complexes royaux, devint la grande capitale politique du Dahomey et a compté jusqu'à 30 000 habitants au XVIII^e siècle. La ville voisine de Cana a

atteint les 15 000 habitants au cours du XVIII^e siècle, devenant le lieu de marchés importants. D'après les historiens, de 21 à 33 pour cent de la population du plateau vivaient à Abomey et Cana, et le reste à la campagne ou au sein d'agglomérations modestes comptant entre une dizaine de familles et un millier d'habitants. Comme au Grand Ardra et à Savi au Sud, ces cités dahoméennes se trouvaient au sommet de la hiérarchie des habitats sur le plateau d'Abomey.

Aujourd'hui, les recherches portant sur les 67 à 79 pour cent de Dahoméens qui ne vivaient pas dans les deux grandes villes s'en sont qu'à leurs débuts. Le Projet sino-danois d'archéologie ou BDARCH, dirigé par Klavs Randsborg, de l'Université de Copenhague, et Alexis Adandé, de l'Université d'Abomey-Calavi, offre cependant un premier aperçu. Les chercheurs du BDARCH ont identifié des structures souterraines sur le plateau d'Abomey et dans les régions limitrophes. Taillées dans la latérite, ces « caves » à entrées cylindriques comportent plusieurs salles reliées entre elles. Elles remontaient à la fin du XVII^e siècle ou au début du XIX^e siècle, ce qui correspond à l'essor du Dahomey. Bien que leur fonction reste

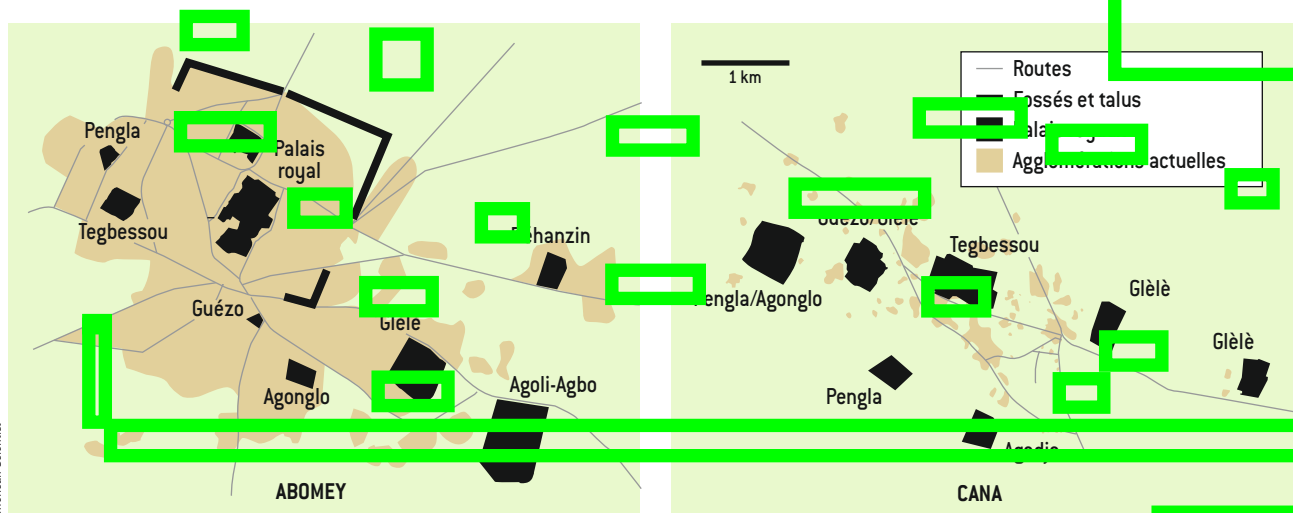
L'AUTEUR



Cameron MONROE est archéologue à l'université de Californie à Santa Cruz. Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

BIBLIOGRAPHIE

- J. C. Monroe et A. Adandé (éds.), *Power and landscape in Atlantic West Africa*, Cambridge University Press, 2012.
- J. C. Monroe, *Continuity, revolution, or evolution on the slave coast of West Africa: Royal architecture and political order in precolonial Dahomey*, *Journal of African History*, vol. 48, pp. 349-373, 2007.
- A. LaViolette et J. Fleisher, *The archaeology of sub-saharan urbanism: Cities and their countryside in African Archaeology: A Critical Introduction*, A. B. Stahl (éd.), Blackwell Publishing, 2005.
- R. Law, *The Slave Coast of West Africa, 1550-1750: The Impact of the Atlantic Slave Trade on an African Society*, Oxford University Press, 1991.



6. ABOMEY ET CANA, DES CITÉS DAHOMÉENNES, telles que les révèle l'archéologie (en noir) comparées aux agglomérations actuelles (beige).

mystérieuse, ces structures servaient très probablement de citernes ou de cachettes lors des chasses à l'esclave.

Pour leur part, les participants au projet archéologique du plateau d'Abomey (*Abomey Plateau Archaeological Project*) de l'Université de Californie, que je dirige depuis 2010, tentent d'établir la dynamique ville-campagne, notamment à partir de l'archéologie des établissements royaux. Comme à Ouidah, les palais royaux du plateau d'Abomey représentent le pouvoir royal. Ces complexes accueillent le roi et ses courtisans, soit à Abomey uniquement, jusqu'à 8 000 personnes. Ils jouaient un rôle majeur dans les prières

annuelles aux ancêtres royaux nommées *Xweta* (voir la figure 4), dont le rite comportait le sacrifice de centaines de prisonniers et la distribution cérémonielle de richesses acquises par la traite.

Nos fouilles ont mis au jour de très nombreux restes de biens européens, dont de la vaisselle en céramique, des bouteilles d'alcool, des pipes, des chiens de fusils, etc., ce qui illustre une fois de plus le rôle symbolique joué par les marchandises européennes au sein des élites dahoméennes (voir la figure 7). Pour autant, les sites ruraux

de l'arrière-pays de Cana n'ont pas livré de traces de marchandises d'importation en quantités comparables, ce qui suggère

que les richesses issues de la traite restaient en grande partie confinées au sein de la sphère royale. Les interactions ville-campagne au sein du royaume dahoméen semblaient donc avoir été les mêmes que celles qui existaient dans celui de Ouidah...

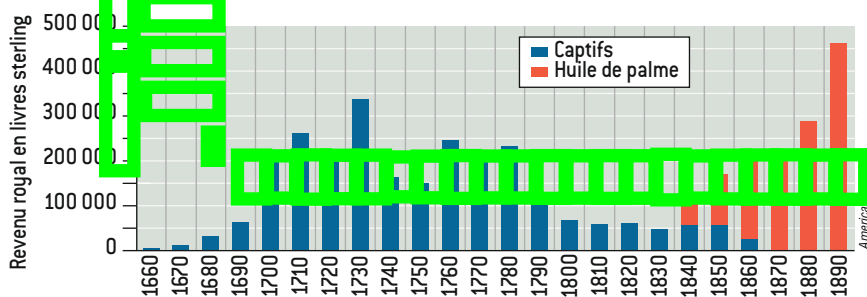
Cependant, la fouille d'établissements moins connus, répartis sur le plateau, raconte une autre histoire. Les récits historiques suggèrent que ces complexes peuvent être assimilés à des manufactures royales, sièges d'activités industrielles ou agricoles. Elles servaient aussi de relais et de garnisons le long des routes commerciales. Ces palais ruraux constituaient ainsi manifestement des « nœuds » d'importance au sein du réseau établi par le pouvoir dahoméen pour assurer son emprise.

Depuis 2000, nous avons identifié et examiné 11 de ces structures palatiales sur le plateau d'Abomey ou dans ses environs immédiates, en plus des neuf déjà connues à Abomey elle-même. Les fragments de marchandises européennes importées, les fouilles récentes et dans le passé auprès de la population locale et les observations actuelles ont tous été utilisés pour dater chacune de ces structures « à l'intérieur » d'un siècle, voire d'un règne dahoméen précis. Les datations obtenues vont du XVII^e au XIX^e siècle.

Des palais à Abomey, capitale du Dahomey

La répartition régionale de ces sites révèle l'évolution au cours du temps des réseaux reliant villes et campagnes. Comme à Ouidah, au XVIII^e siècle, on n'a construit de palais qu'à Abomey. À l'évidence, la capitale constituait le cœur du réseau, à une époque où les élites régionales devaient se contenter des ressources locales. Cependant, peu après avoir conquis ses voisins du Sud, le Dahomey construisit des palais dans les villes et les grandes cités situées le long des principales voies servant à amener les captifs à la côte. Cela suggère que l'État du Dahomey s'est alors efforcé d'étendre son autorité bien au-delà de la capitale, donc d'une façon bien différente de celle dont le royaume de Ouidah pratiquait au XVII^e siècle. En réussissant à contrôler d'importants carrefours du commerce inter-régional, le Dahomey a pu centraliser l'exportation des captifs et, partant, maîtriser l'accès aux biens européens.

Plus tard, au XIX^e siècle, la construction de palais a étendu considérablement l'in-



7. CES PERLES, TUYAUX DE PIPE, CAURIS, BOUTEILLES ET AUTRES CHIENS DE FUSILS trouvés à Cana sont des exemples de marchandises européennes recherchées par les élites royales dahoméennes. Les armes en étaient une partie essentielle : elles permettaient aux troupes du roi de capturer de futurs esclaves dans les populations environnantes. Après que, au début du XIX^e siècle, les puissances européennes ont aboli l'esclavage, l'État royal du Dahomey s'est adapté en faisant désormais les captifs à travailler dans les plantations royales où l'on produisait de l'huile de palme. Comme l'illustre l'évolution des revenus royaux au cours du temps, la vente d'huile est alors devenue la principale source de revenus du pouvoir royal (en haut).

fluence de l'élite, ici plus profondément dans l'arrière-pays d'Abomey et dans celui de Cana. Les complexes royaux les plus vastes ont été construits à Abomey et à Cana, et des établissements satellites sont apparus en divers points du territoire. Manifestement le pouvoir royal diffusait dans le pays à partir des centres administratifs qu'étaient Abomey et Cana. Tout comme au XVIII^e siècle, la multiplication des établissements royaux en direction du Sud s'explique par le contexte international.

En effet, les revenus royaux provenant de la traite s'étaient mis à baisser à mesure que les puissances européennes interdisaient la traite. Après le Danemark en 1803, ce fut le tour de la Grande-Bretagne en 1807, des États-Unis en 1808, de la Hollande en 1814, de la France en 1818 et de la Suède en 1824 ; ont suivi l'Espagne en 1835 et le Portugal en 1836. De 1797 à 1804, les forts européens de Ouidah furent abandonnés, puis, à partir de 1807, l'escadre britannique de l'Afrique de l'Ouest, parfois aidée par la marine américaine, imposa plusieurs dizaines d'années durant un blocus à tout navire négrier se présentant le long de la Côte des esclaves. Cela fit chuter le nombre de cargaisons humaines quittant la côte. Dans le même temps, des émissaires européens encourageaient les États ouest-africains tels le Dahomey à développer leur commerce de produits agricoles, principalement d'huile de palme, de plus en plus recherchée en Europe pour la confection de savons, de bougies et de lubrifiants industriels.

Cette évolution de l'attitude européenne eut un profond impact sur la stabilité politique des États de la région. La traite, qui supposait pouvoir coercitif (militaire) et réseaux à grande distance, n'était à la portée que des élites, mais chacun pouvait cultiver des palmiers... De petits planteurs et commerçants de nombreux royaumes africains purent ainsi accumuler des richesses et rivaliser avec les rois, ce qui déséquilibra l'ordre social.

Les dynasties royales ouest-africaines furent donc forcées de réagir au risque de disparaître. Certaines, tel le royaume dahoméen, réussirent en remplaçant la vente des captifs aux Européens par leur exploitation au sein d'unités de production, ce qui transforma radicalement l'organisation politique et économique. Le Dahomey continua à mener contre ses voisins des campagnes militaires pour rassembler des p-



8. APRÈS L'ABANDON DE LA TRAITÉ DES ESCLAVES COMME PRINCIPAL RESSOURCE, l'État dahoméen s'est tourné à nouveau vers l'économie des produits agricoles, tout en développant même sur les marchés ruraux. Il installa le long des routes principales et à l'entrée des places de marché un réseau de perceptions nommé *denun*.

sonniers, mais ces captifs étaient mis au travail – force – dans la production agricole à grande échelle. En plus d'accroître la population d'esclaves domestiques, cette transition économique développa les échanges locaux et la richesse des communautés rurales : l'économie dahoméenne se ruralisa.

De la traite à la taxe

Le pouvoir dahoméen réagit en créant des impôts sur la production agricole et les marchés locaux. Dans les principaux marchés du Dahomey, des fonctionnaires étaient responsables de la collecte des impôts et du maintien de l'infrastructure des marchés. En plus des impôts levés sur les marchandises vendues, un réseau de perceptions nommé *denun* fut créé dans tout le royaume afin de collecter l'impôt auprès des commerçants itinérants (voir la figure 8). L'officier de marine britannique Frederick Forbes, qui visita deux fois le Dahomey entre 1849 et 1850, écrivit :

Longtemps pour tous, les impôts sont prélevés par des percepteurs. Les dépositaires des Coutumes disposent de percepteurs stationnés sur tous les marchés, qui reçoivent un nombre de taxes dépendant de la valeur des marchandises proposées à la vente. À côté de ceux-ci il y a des percepteurs sur toutes les routes publiques conduisant d'un district à un autre et sur la lagune de chaque côté de Ouidah ; tout est taxé et les taxes vont au roi.

Les complexes royaux construits à cette époque peuvent être considérés

comme des nœuds au sein du réseau de perceptions destinées à taxer les marchés locaux et les commerçants empruntant les principales routes. Ceux qui se trouvaient loin d'Abomey percevaient des impôts sur toutes les poteries, les étoffes, les armoiries et l'huile de palme qui s'échangeaient sur place. Ces impôts en nature ou en monnaie étaient ensuite centralisés à Abomey.

Malgré les trois décennies de recherches au Bénin, les archéologues du paysage existent encore à gratter la surface... du passé. Nous commençons seulement à reconstituer les liens politiques et économiques entre les populations rurales et les élites urbaines et à comprendre de quelles façons ces élites ont transformé ces liens pour réagir et s'opposer aux forces extérieures.

Toutefois, notre compréhension des sociétés africaines antérieures à la traite des esclaves reste faible. Nous mesurons mal comment le commerce avec les Européens a vraiment affecté la vie quotidienne de centaines de milliers de gens qui vivaient au Sud du Bénin. C'est pourquoi des archéologues commencent à fouiller des sites intérieurs à la traite et tentent d'étudier les systèmes de production et d'échanges qui y étaient employées. Ces nouveaux projets devraient nous orienter dans notre quête pour mieux comprendre dans quel contexte les États négriers africains de l'époque de la traite transatlantique ont émergé.

Le vent

et la dispersion des plantes

Ángel Melicísimo et Jesús Muñoz

Dans l'hémisphère Sud, des lieux très éloignés ont en commun de nombreuses espèces végétales.

Les vents, plutôt que la dérive des continents, semblent à l'origine de certaines de ces similitudes.

L'ESSENTIEL

- ✓ Les flores de certaines régions éloignées présentent des similitudes. L'une des hypothèses pour expliquer ces dernières est le transport d'éléments végétaux par le vent.
- ✓ Des données sur les vents, obtenues par satellite, ont permis de tester l'hypothèse du vent pour près de 27 sites choisis dans l'hémisphère Sud.
- ✓ Les résultats montrent que la dispersion par le vent est le mécanisme le mieux à même d'expliquer la similarité floristique de lieux très distants, du moins pour certains groupes d'espèces.

© Shutterstock/PHILLIP LADDESIGN and Fotogram

Les espèces animales et végétales se répartissent de diverses façons sur la Terre. Certaines régions du globe présentent ainsi des flores similaires, d'autres des flores très différentes.

En 1918, le botaniste allemand Ludwig Diels a distingué six « royaumes floristiques » sur la planète, repris et conceptualisés plus tard par le botaniste anglais Ronald Good (1896-1992). Ces « royaumes » se caractérisent par un degré élevé d'endémisme au niveau des familles de plantes. Ils ont pour noms *Holarctis* (l'Amérique du Nord, l'Europe et le Nord de l'Asie), *Palaetropis* (l'Afrique, le Moyen-Orient et le Sud de l'Asie), *Neotropis* (les Amériques centrale et du Sud), *Capensis* (la région du Cap, en Afrique du Sud), *Australis*, et *Antarktis*. Les royaumes floristiques se subdivisent à leur tour en provinces floristiques, caractérisées par un endémisme élevé au niveau des espèces végétales.

Comment expliquer les différences et similitudes que l'on observe sur les flo-

res de diverses régions de la Terre ? Cette question centrale de la biogéographie est débattue depuis près de deux siècles, mais elle reste insuffisamment étayée sur le plan expérimental. Nous avons récemment effectué des analyses statistiques qui apportent une contribution de cette nature. Comme nous le détaillerons dans la suite, elles mettent en exergue l'importance du vent dans la diffusion des plantes sur de longues distances, au moins dans l'hémisphère Sud.

Géographie végétale : trois hypothèses

La distribution des espèces sur le globe a fait l'objet de trois principales hypothèses pour l'expliquer : l'« hypothèse de la vicariance », celle de la « dispersion à longue distance » et l'« hypothèse géodésique ». Pourquoi consistent ces théories ?

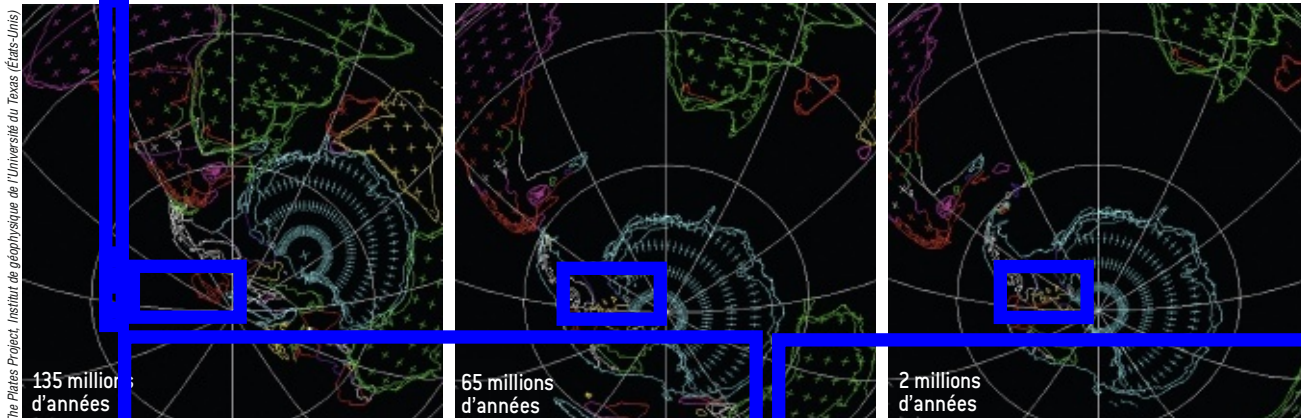
L'hypothèse de la vicariance a été formulée dans les années 1970 par Leon Croizat, Gareth Nelson et Donn Rosen, du

Muséum américain d'histoire naturelle, pour expliquer l'histoire évolutive des espèces. Selon eux, les similitudes et différences floristiques et faunistiques constatées aujourd'hui entre les diverses régions de la planète dépendraient de l'histoire géologique des continents.

Prenez l'exemple important des continents de l'hémisphère Sud : l'Antarctique, l'Amérique du Sud, l'Afrique du Sud et l'Australie. Il y a quelque 135 millions d'années, à la fin du Jurassique, ces terres qui étaient alors toutes réunies en un supercontinent nommé Gondwana ont commencé à se séparer. Les espèces se sont retrouvées isolées, ont évolué indépendamment et sont peu à peu différenciées. C'est ce mécanisme qui expliquerait les similitudes et les différences observées dans les faunes et flores de ces continents.

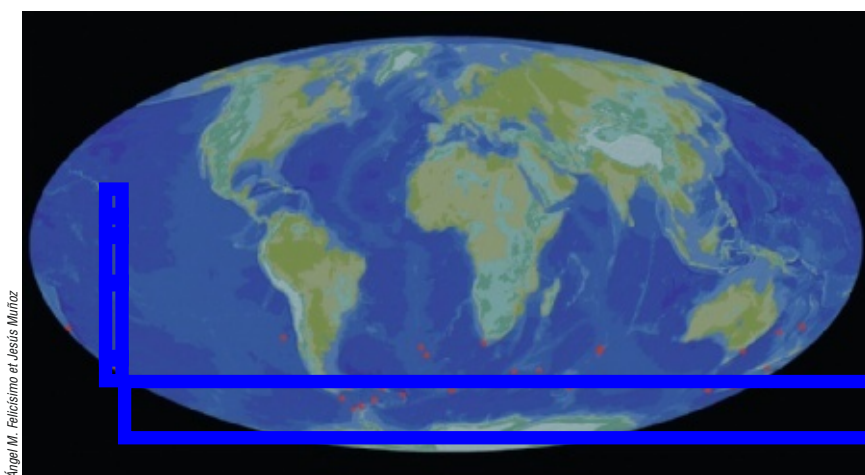
Selon l'hypothèse de la vicariance, plus la séparation géologique entre deux blocs est récente, plus le nombre d'espèces qui leur sont communes est grand, et plus leur flore se ressemble. En revanche, plus cette





1. IL Y A 135 MILLIONS D'ANNÉES, les actuels continents de l'hémisphère Sud, réunis en un supercontinent nommé Gondwana, ont commencé à se séparer. La plaque correspondant aujourd'hui à l'Inde était réunie à Madagascar, à l'Afrique et à l'Antarctique. Ces deux derniers continents ont commencé à se séparer il y a environ 120 millions d'an-

nées. Puis ce fut le tour de l'Inde et de Madagascar, il y a quelque 65 millions d'années. Selon l'hypothèse de la vicariance, la similitude floristique de deux régions est inversement proportionnelle au temps écoulé depuis leur séparation géologique : faute d'échanges génétiques entre les populations, celles-ci évoluent de façon indépendante.



2. L'ANALYSE EFFECTUÉE PAR LES AUTEURS porte sur la répartition de plantes appartenant à quatre groupes botaniques et prend en compte 27 localités (en rouge) de l'hémisphère Sud.

séparation remonte loin dans le temps, plus la flore de ces régions a eu de possibilités d'évoluer et de se singulariser.

L'hypothèse de la « dispersion à longue distance » sous-entend que certaines espèces sont transportées par le vent jusqu'à des milliers de kilomètres de leur zone d'origine. Ce processus rendrait possible la colonisation de lieux très éloignés les uns des autres. Il s'applique aux espèces dont les éléments sont légers ou peuvent se propager grâce à de petits fragments – des propagules (pour une reproduction non sexuée), graines ou spores (pour une reproduction sexuée). Les végétaux aux graines lourdes ou volumineuses sont exclus de ce mode de dispersion.

Comment le vent agit-il ? Son efficacité pour relier deux régions distantes dépend de sa vitesse et de sa direction. Deux lieux

éloignés peuvent être raccordés s'il existe un flux d'air intense et direct d'un de ces lieux à l'autre. Cela expliquerait la présence d'espèces communes dans des endroits qui n'ont jamais été proches géographiquement. À l'inverse, deux régions proches peuvent se retrouver isolées si aucun vent direct ne souffle de l'une vers l'autre.

La grande différence entre l'hypothèse de la vicariance et celle de la dispersion à longue distance sous l'effet du vent est d'ordre temporel. L'hypothèse de la vicariance part de l'idée que la répartition des espèces dépend, par essence, d'un processus historique s'étalant sur des millions d'années. D'après celle de la dispersion à longue distance, ce sont des mécanismes récents

qui expliquent le mieux cette répartition : la similitude floristique serait étroitement liée aux schémas actuels de circulation des vents.

Selon l'« hypothèse géodésique », enfin, la ressemblance floristique entre deux lieux serait inversement proportionnelle à la distance qui les sépare. Ces distances varient en fonction de la dérive des continents, d'où une prise en compte du facteur historique. L'hypothèse géodésique ne nie pas le rôle du vent, mais elle considère pour acquis que la résultante des flux n'a pas de direction privilégiée : à plus ou moins long terme, le vent relie tout avec tout, de sorte que la probabilité de propagation d'une espèce ne dépend plus que de la distance.

Les deux premières hypothèses, celle de la vicariance et de la dispersion à longue distance, font débat depuis des décennies. La troisième est plus récente – elle date de 2001 – et ne bénéficie pas du recul nécessaire. Nous avons donc cherché à vérifier si l'une de ces hypothèses pouvait expliquer la similitude floristique observée sur un ensemble de régions de l'hémisphère Sud très éloignées les unes des autres.

Une analyse statistique

Il s'agit d'établir scientifiquement la vraisemblance de ces hypothèses sur des bases statistiques, en confrontant les données d'observation aux données théoriques, c'est-à-dire aux résultats pressentis pour chaque hypothèse.

La zone que nous avons choisie pour notre analyse s'étend entre la côte du continent Antarctique et le 30^e degré de latitude Sud. Elle représente environ 25 pour cent de la superficie de la Terre, que les océans recouvrent à 70 pour cent. Nous avons

sélectionner 27 sites pour lesquels nous disposions d'un nombre suffisant de données biologiques. Certains sont situés sur la partie continentale, mais la plupart sont constitués d'îles océaniques.

L'hémisphère Sud offre un cadre d'expérimentation privilégié, car on y trouve des zones géologiques d'âges très divers. Certaines très anciennes, ont fait partie du Gondwana ; d'autres, plus récentes, sont nées de l'activité volcanique ou de mouvements tectoniques. Ces lieux sont également isolés, ce qui élimine toute possibilité de transfert par éolien, ce qui aurait beaucoup nui à la pertinence de notre test.

Quatre groupes de plantes testés

Nous avons choisi quatre groupes taxonomiques bien représentés dans cette zone : les mousses, les hépatiques, les lichens et les fougères (voir la figure 4). Les bryophytes (mousses et hépatiques) ainsi que les lichens ont la capacité de se disperser et se multiplier par propagules non sexués. Ce mode de reproduction asexuée facilite la colonisation, car même de minuscules propagules peuvent être viables si les conditions climatiques et la nature du sol sont, sur le lieu de destination, favorables. De plus, les propagules résistent mieux que les spores aux conditions environnementales difficiles dans lesquelles peut se produire la dispersion (faibles températures et intense rayonnement ultraviolet).

Les fougères, elles, se disséminent par l'intermédiaire de spores. Ce mode de diffusion complique beaucoup la colonisation, car pour clore le cycle de reproduction, deux gamétophytes de sexe distinct doivent coïncider dans l'espace et dans le temps.

Nous avons collecté et traité quatre types de données : biologiques, géologiques, éoliennes et géographiques. Les données biologiques sont constituées par des listes de présence (ou d'absence) d'espèces. Elles ont été élaborées en prenant en compte la bibliographie existante et en interrogeant les experts. À partir du nombre d'espèces communes, ou non, une matrice de similarité floristique a été élaborée pour chaque groupe taxonomique. Une telle matrice est un tableau dont chaque élément est un nombre, un indice qui représente la similarité floristique entre deux des 27 sites

considérés. La fiabilité des indices de similarité floristique dépend, entre autres, du nombre d'espèces retenues. Dans le cas de notre étude, 1851 espèces ont été prises en compte : 601 mousses, 461 hépatiques, 57 lichens et 192 fougères.

Les données géologiques correspondent au temps qui s'est écoulé depuis la séparation des deux sites sous l'effet de la dérive des continents. L'indice de similarité géologique est inversement proportionnel au temps. Des valeurs proches de 0 indiquent une séparation ancienne (dans notre cas, environ 135 millions d'années). Des valeurs proches de 1 témoignent d'une séparation récente. Aux îles volcaniques qui n'ont jamais fait partie du Gondwana a été attribué un temps de séparation infini (l'indice de similarité géologique est nul). Si l'hypothèse de la vicariance était confirmée, la matrice de similarité géologique sera étroitement corrélée aux matrices de similarité floristique.

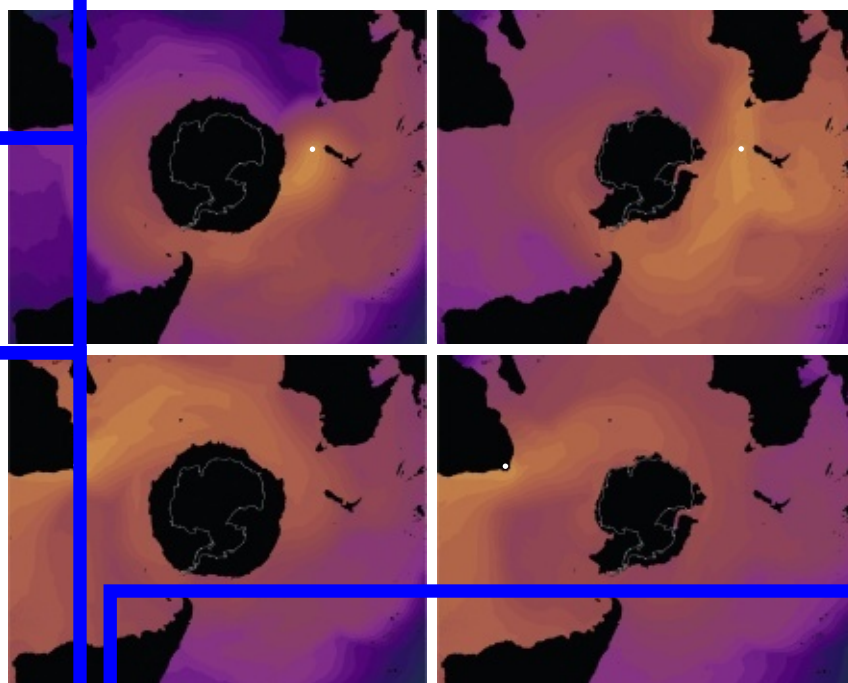
Pour tester l'hypothèse de la dispersion par le vent, il est nécessaire de calculer le degré de connectivité éolienne entre deux sites. Les données de base ont été fournies par le satellite QuikSCAT, lancé par la NASA en juin 1999 et qui a cessé de

LES AUTEURS



Ángel Manuel FELICÍSIMO travaille au Département d'expression graphique de l'Université d'Estrémadure, en Espagne.

Jesús M. MUÑOZ est botaniste au Jardin botanique royal de Madrid, ainsi que chercheur associé au Jardin botanique du Missouri à Saint-Louis (États-Unis).



3. DES MODÈLES DITS DE CONTRAINTÉ déterminent la résistance à vaincre, compte tenu des vents, pour aller d'un point à un autre du globe. Plus cette contrainte est faible, plus les deux points en question sont reliés par le vent (connectivité éolienne élevée). Ces images indiquent la connectivité éolienne des points de l'hémisphère Sud par rapport à un point (en blanc) correspondant aux îles Auckland (en haut) ou à l'Afrique du Sud (en bas), mi-novembre 2003 (images de gauche) et mi-janvier 2004 (images de droite). La connectivité varie entre 0 (en bleu foncé) et 1 (en orange). Le noir correspond aux régions terrestres ou recouvertes de glace.



4. QUATRE GROUPE BOTANIQUES ont servi de base à l'étude des auteurs sur la répartition des espèces végétales : les fougères (a), les hépatiques (b), les lichens (c) et les mousses (d). Les fougères se propagent par des spores, les hépatiques, lichens et mousses se disséminent surtout par l'intermédiaire de petits fragments végétaux non vivants.

BIBLIOGRAPHIE

- Á. M. Felicísimo et al. *FORCLIM*. Bosques y cambio global, Programa COTED, Madrid, Bubok Publishing S. L., 2011.
- Á. M. Felicísimo et al. *Open surface winds drive dynamics of transoceanic aerial movements*, *PLoS ONE*, vol. 3(8), e2928, 2008.
- J. Muñoz et al. *Wind as long distance dispersal vehicle in the southern hemisphere*, *Science*, vol. 304, pp. 1144-1147, 2004.
- A. C. M. Stofelen, *Scatterometry*, Electronic Theses and Dissertations, Université d'Utrecht, 1999. <http://igitur.archive.library.uu.nl/dissertation/01840669/inhoud.htm>
- J. M. Bullock et al. *Dispersal Ecology*, Blackwell, 2002.
- Mission *QuikSCAT* de la NASA/JPL : <http://winds.jpl.nasa.gov>

fonctionner en 2009. *QuikSCAT* embarquait le capteur *SeaWinds*, qui mesurait l'intensité et la direction des vents océaniques. Depuis son orbite, à 803 kilomètres d'altitude, ce diffusomètre émettait des impulsions de micro-ondes à une cadence élevée (voir l'encadré page 45). Plus la vitesse du vent est grande, plus la mer est agitée et rugueuse. Or une surface rugueuse diffuse davantage les signaux micro-ondes qu'une surface lisse. L'intensité de l'écho reçu par *SeaWinds*, qui dépend donc de la rugosité de la surface marine, permet alors d'estimer la vitesse du vent.

Ces données, traitées par le Laboratoire de propulsion spatiale (JPL) de la NASA, sont mises gratuitement à la disposition de la communauté scientifique sur Internet. Les données étant recueillies quotidiennement, la résolution temporelle est excellente. La résolution spatiale est de 25 kilomètres. En raison des trajectoires du satellite, certaines zones océaniques en forme de fuseau, orientées Nord-Sud, ne sont pas couvertes. Mais cet inconvénient peut être surmonté en combinant les données de plusieurs jours consécutifs.

Nous avons utilisé toutes les données éoliennes disponibles au moment de

notre étude, c'est-à-dire presque quatre années d'informations quotidiennes, de juin 1999 à mars 2003. Nous avons ensuite continué la collecte et ajouté des données tous les six mois.

Les données éoliennes ne permettent pas de calculer directement les valeurs de connectivité entre les lieux étudiés. Il faut pour ce faire calculer des modèles de contrainte anisotrope. De quoi s'agit-il ?

Un modèle de contrainte se présente sous la forme d'une carte où à chaque point est associée une valeur exprimant la contrainte ou la résistance à vaincre pour aller d'un point fixé au point considéré (voir la figure 3). En l'absence de vent, la contrainte est isotrope : l'effort est indépendant de la direction du mouvement. En présence de vent, elle est anisotrope et dépend de la vitesse et de la direction du vent en chaque point, ainsi que de leurs variations au fil du temps. L'effort total est égal à la somme des efforts correspondant à chacun des petits tronçons qui composent le parcours. Il peut être supérieur ou inférieur à la situation de contrainte isotrope, correspondant à l'absence de vent : le vent peut en effet s'opposer au mouvement ou le faciliter.

Évaluer la connectivité éolienne

Sur ce principe, nous avons estimé le degré de connectivité éolienne entre les lieux étudiés. Nous avons calculé les modèles de contrainte entre chacun des 27 sites d'origine possibles et le reste des localités. Pour ce faire nous avons utilisé un système d'information géographique, en répétant l'analyse à dix jours d'intervalle durant près de quatre ans. Nous avons ainsi obtenu 139 ensembles de 27 modèles de contraintes, chacun de ces modèles indiquant pour la décalée considérée, le degré de connectivité éolienne entre chacune des 27 localités et les 26 autres.

À partir de la série temporelle constituée par les 139 ensembles, nous avons construit une matrice qui rassemble les valeurs maximales de connectivité observées pour chaque paire de sites, pour la période allant de 1999 à 2003. Enfin, nous avons calculé les distances géographiques entre les 27 localités de l'étude. Ces données ne posent pas de difficultés particulières, elles sont déterminées par des formules géodésiques simples et bien connues.

Pour résumer, nous avons obtenu sept matrices mesurant la similarité entre les 27 localités étudiées. Quatre matrices traduisent la similitude floristique (une matrice pour chacun des quatre groupes botaniques considérés). Une cinquième correspond à la similitude géologique, sur laquelle s'appuie l'hypothèse de la vicariance. Une sixième matrice synthétise la connectivité éolienne sur la période allant de 1999 à 2003 (en liaison avec l'hypothèse de dispersion à grande distance par le vent). Enfin, une septième matrice exprime la proximité géographique entre les 27 sites (en liaison avec l'hypothèse géodésique).

L'étape suivante de notre analyse a consisté à mesurer la corrélation, ou degré d'association, entre les matrices de similitude floristique et celles qui correspondent à chacune des trois hypothèses proposées pour expliquer la répartition des végétaux.

Cette corrélation a été mesurée à l'aide d'une technique statistique comportant deux étapes (nommées positionnement multidimensionnel et analyse procustéenne). Sans entrer dans les détails, l'analyse statistique fournit *in fine* une valeur P comprise entre 0 et 1 qui mesure le caractère aléatoire du lien entre les deux matrices comparées. Autrement dit, plus la valeur de P est petite, plus les deux matrices en question sont corrélées. Par exemple, une valeur $P = 0,005$ signifie que la

Cette analyse a été appliquée pour comparer les matrices de similarité floristique avec celle des temps de séparation géologique, celle de la connectivité éolienne maximale et celle des distances géographiques.

Les résultats montrent que l'hypothèse de la dispersion à longue distance par les vents est la plus vraisemblable. En effet, la corrélation de la similarité floristique avec la connectivité éolienne est toujours supérieure à la corrélation avec les temps de séparation géologique ou avec les distances géographiques. C'est seulement dans le cas des fougères que la distance géographique montre une corrélation significative (voir l'encadré page 46).

COMMENT MESURER LES VENTS OCÉANIQUES

Un diffusomètre est un radar qui permet de mesurer le vent en envoyant des impulsions électromagnétiques micro-ondes sur la surface de la mer et en enregistrant l'intensité de l'écho qui revient. La diffusion des ondes par la mer dépend

de la rugosité de sa surface, elle-même liée à la vitesse du vent. Ainsi, l'intensité de l'écho capté, qui dépend de cette rugosité, permet d'estimer la vitesse du vent à l'instant où est effectuée la mesure.



Le satellite QuikSCAT

Un laboratoire spatial

Les données diffusométriques ont été fournies par le satellite QuikSCAT lancé par la NASA le 19 juin 1999. Il embarquait SeaWinds, un capteur qui mesurait la vitesse et la direction du vent à la surface des océans. Ce type de données met en évidence les interactions entre l'atmosphère et la mer, les courants océaniques et les phénomènes météorologiques cycliques tels que El Niño.

Grâce à son antenne parabolique tournante, SeaWinds balayait l'océan en envoyant des impulsions électromagnétiques de 13,4 gigahertz (dans le domaine des micro-ondes), à une cadence de 189 impulsions par seconde et avec une puissance de 110 watts.

Les vagues engendrées par le vent à la surface de la mer réfléchissent l'onde radar en la diffusant. De la mesure de cette redistribution sont déduites la vitesse et la direction du vent en surface. Les vents sont estimés avec une incertitude de 2 mètres par seconde pour la vitesse et de 20 degrés pour la direction ; la résolution spatiale est de 25 kilomètres.

Plus la vitesse du vent est élevée, plus la rugosité de la surface de la mer est importante et moins l'écho reçu par le capteur sur le satellite est intense.

Écho renvoyé par la surface de la mer

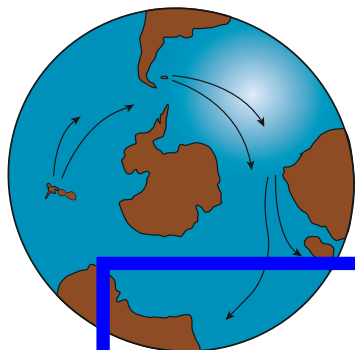
Impulsion micro-onde émise

Les nuages n'arrêtent pas les micro-ondes : le diffusomètre peut donc opérer dans des conditions météorologiques très diverses et à n'importe quel moment de la journée ou de la nuit.

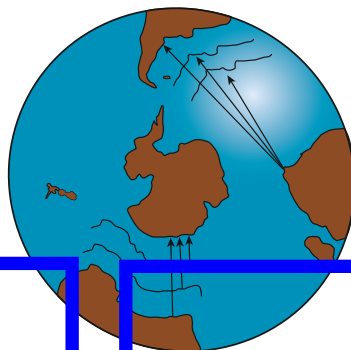
TROIS HYPOTHÈSES CONFRONTÉES AUX OBSERVATIONS

Trois hypothèses ont été avancées pour expliquer la répartition des espèces végétales : l'hypothèse de la vicariance, celle de la dispersion à longue distance par le vent et l'hypothèse géodésique. Pour déterminer l'hypothèse la plus vraisemblable, les auteurs ont confronté ces hypothèses aux répartitions observées des mousses, des hépa-

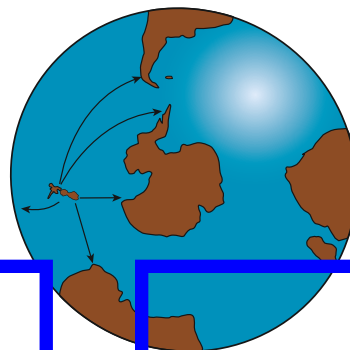
tiques, des lichens et des fougères sur une vaste zone autour de l'Antarctique. Ils ont comparé les valeurs d'une grandeur statistique P qui mesure le caractère aléatoire de l'ajustement entre théorie et observations. Plus la valeur de P est petite, plus la corrélation statistique est élevée, et donc plus l'hypothèse correspondante est vraisemblable.



Hypothèse de la dispersion par le vent :
La similarité floristique entre deux lieux dépend de la configuration des vents.



Hypothèse de la vicariance :
Plus la séparation géologique entre deux lieux est récente, plus leurs flores sont semblables.



Hypothèse géodésique :
La similarité floristique entre deux lieux est inversement proportionnelle à la distance qui les sépare.

	Hypothèse éolienne	Hypothèse de la vicariance	Hypothèse géodésique
Mousses	0,04	0,01	0,12
Hépatiques	0,004	0,10	0,062
Lichens	0,003	0,367	0,260
Fougères	0,003		0,003

Le pouvoir du vent

L'hypothèse de la dispersion éolienne à longue distance est celle qui s'accorde le mieux avec les observations. Elle présente un effet de valeurs d'ajustement très significatives et toujours supérieures à celles des hypothèses concurrentes (paramètre P inférieur à 0,05 pour vent, en orange). L'hypothèse de la vicariance n'explique la similarité floristique pour aucun des groupes végétaux étudiés (elle n'a pu être évaluée pour les fougères, qui ne se développent pas partout dans la région considérée). L'hypothèse géodésique n'offre une bonne corrélation avec les observations que dans le cas des fougères.

Angela Felisimo, Jesús Muñoz

Ainsi, l'hypothèse de la vicariance n'explique pas la similarité floristique pour les trois premiers groupes taxonomiques étudiés. Pour le quatrième, celui des fougères, le nombre de localités ayant fait partie du Gondwana et où l'on trouve ces plantes aujourd'hui est trop restreint (le climat froid empêche le développement des fougères dans l'Antarctique et dans les îles subantarctiques). De plus, une partie des îles incluses dans notre étude sont d'origine volcanique et récente : elles n'ont jamais fait partie du Gondwana et n'entrent donc pas dans le schéma de la séparation géologique.

Quant à l'hypothèse géodésique fondée sur les distances actuelles entre les localités, elle ne présente une bonne corrélation que dans le cas des fougères.

En résumé, l'étude conforte l'hypothèse de la dispersion éolienne à longue distance comme facteur déterminant de la similitude floristique pour les groupes analysés. La vicariance ne peut donc expliquer

la présence ou l'absence des espèces actuelles, même si elle peut éventuellement s'appliquer à des groupes végétaux supérieurs.

Il est évidemment impossible d'extrapoler ces résultats à l'ensemble de la flore et de la faune. La dispersion passive par le vent ne peut être un mécanisme de dissémination efficace pour des éléments suffisamment légers, tels que tout petits insectes, des algues d'eau douce ou des champignons.

Et l'Atlantique Nord ?

Nous poursuivons ces travaux selon plusieurs axes complémentaires. Tout d'abord, il s'agit d'effectuer le même type d'analyses sur d'autres groupes taxonomiques, végétaux et animaux. En second lieu, nous comptons mesurer la distance génétique existant entre différentes populations d'espèces présentes sur un grand nombre de sites étudiés. Cela nous permettra de vérifier si les dis-

tances génétiques restent en relation avec la connectivité éolienne ou avec la distance géographique.

À l'heure actuelle, nous reproduisons ces tests sur le Nord de l'Atlantique, zone où nous pouvons aussi utiliser, en plus du nombre d'espèces communes à deux lieux terrestres, la similarité génétique d'un ensemble d'espèces choisies. Nous avons élargi notre étude à d'autres groupes d'organismes que les quatre considérés dans nos travaux sur l'hémisphère Sud, et nous avons inclus les pucerons, les tardigrades (minuscules animaux à huit pattes formant un groupe apparenté aux arthropodes), les papillons de la superfamille des pyrales et certains groupes de champignons.

Les résultats de ces études devraient nous permettre de dresser un tableau plus complet du rôle joué par le vent dans la dispersion à longue distance des espèces végétales et animales.

★ MUSÉE DU QUAI BRANLY
là où dialoguent les cultures

LA REVUE GRADHIVA★

EN VENTE EN LIBRAIRIE

ET EN LIGNE SUR <http://www.librairie-epona.fr/revues/gradhiva.html>

Robots étrangement humains

Coordonné et présenté par Denis Vidal
et Emmanuel Grimaud

Qu'est-ce qui est en jeu lorsqu'on donne à un robot une apparence humaine, ou lorsqu'on croise son regard ? Autour de cette question gravitent les différentes contributions à ce numéro de la revue *Gradhiva*. Développant une anthropologie comparée des créatures artificielles dans leur diversité (des automates de l'Inde ancienne aux dernières créations du marché des *sex toys*, en passant par les marionnettes japonaises), les auteurs du dossier envisagent ces moments d'interaction qui obligent l'homme, confronté à sa propre image, à instaurer une relation nouvelle à des objets qui lui ressemblent et qui peuvent autant susciter le malaise que l'empathie. Pour ce faire, ils s'attachent à libérer la robotique humanoïde des discours prophétiques qui l'accompagnent souvent pour mieux en saisir les enjeux contemporains, à l'aide notamment d'une ethnographie précise des pratiques de laboratoires. Dans la perspective interdisciplinaire qui est la sienne, la revue *Gradhiva* apporte avec ce numéro une contribution inédite à l'étude des machines anthropomorphes.

★ musée du quai Branly

GRADHIVA

15

Robots étrangement humains

Retrouvez les numéros précédents de GRADHIVA sur www.quaibranly.fr/gradhiva

La face cachée des Orages

Les orages sont beaucoup plus actifs qu'on ne le pensait.
Outre les éclairs, des émissions variées se produisent...
au-dessus des nuages.

Élisabeth Blanc et Thomas Farges

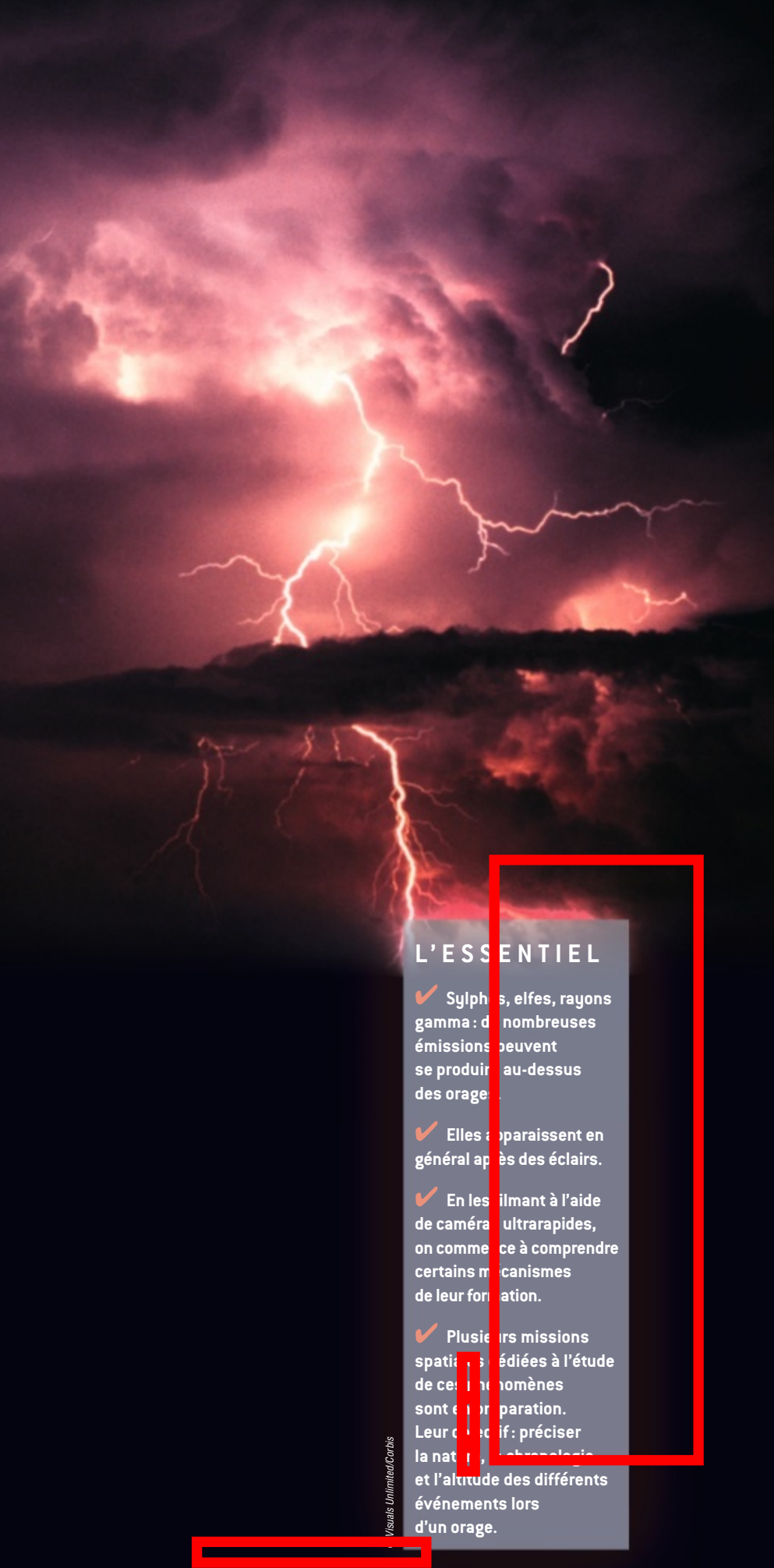
Un soir de 1989, une caméra télescopée par l'équipe de John Winckler de l'Université du Minnesota, aux États-Unis, enregistre un mystérieux flash lumineux à haute altitude dans l'atmosphère, au-dessus d'un orage. L'idée que ce flash puisse être produit par l'orage entraîne un nouvel examen d'images d'orages prises depuis la navette spatiale américaine : plusieurs montrent des flashes lumineux similaires, surgissant au sommet des nuages illuminés par les éclairs. En 1993, une caméra embarquée à bord d'un avion par l'équipe de Davis Sentman, de l'Université d'Alaska, prend la première photo en couleurs d'un « sylphe » rouge (« red sprite »), donné par D. Sentman pour évoquer l'extrême

phénomène sans suggérer de mécanisme physique *a priori*) – un jet de lumière rouge qui s'étend du sommet des nuages à la base de l'ionosphère, à une centaine de kilomètres d'altitude. Cette découverte marque le début d'une chasse internationale aux sylphes, mettant en œuvre de nombreuses expériences dans les différentes parties du monde.

La chasse s'est révélée fructueuse. En une dizaine d'années, les émissions lumineuses rares détectées au-dessus des zones orageuses – rassemblées sous le nom d'événements lumineux transitoires (TLE) – ont modifié notablement notre compréhension des orages atmosphériques et des échanges énergétiques transitoires entre les couches atmosphériques.

Par ailleurs, des satellites d'astronomie ont mesuré des émissions de rayons gamma – des flashes gamma d'origine terrestre (TGF) – atteignant 30 mégaelectronvolts, soit des énergies comparables à celles des émissions gamma d'origine solaire. De telles énergies, qui n'étaient pas attendues dans l'atmosphère terrestre, ont bouleversé notre compréhension des orages atmosphériques. À partir de 2007, les mesures du satellite AGILE ont même révélé de nombreux photons à des énergies atteignant 100 mégaelectronvolts – une énergie qui remet en cause les mécanismes proposés jusqu'alors.

Que sont les événements lumineux transitoires et les flashes gamma d'origine terrestre ? Comment sont-ils produits ?



L'ESSENTIEL

- ✓ Sylphes, elfes, rayons gamma : de nombreuses émissions peuvent se produire au-dessus des orages.
- ✓ Elles apparaissent en général après des éclairs.
- ✓ En les filmant à l'aide de caméras ultrarapides, on commence à comprendre certains mécanismes de leur formation.
- ✓ Plusieurs missions spatiales dédiées à l'étude de ces phénomènes sont en préparation. Leur objectif : préciser la nature, la chronologie et l'altitude des différents événements lors d'un orage.

Visuals Unlimited/Cortis

émission ? Que nous enseignent-elles sur les échanges d'énergie dans l'atmosphère supérieure ? Telles sont les questions que nous allons examiner ici.

Jusqu'en 1989, on pensait que les seules manifestations lumineuses des orages étaient les éclairs, des décharges électriques se produisant entre deux nuages ou entre un nuage et le sol, selon un mécanisme qui commençait à être bien compris : la base du nuage orageux se charge négativement, tandis que, par influence électrostatique, des charges positives s'accumulent au sol. La base du nuage et le sol constituent ainsi un condensateur géant. Par le jeu des instabilités atmosphériques, les charges à la base du nuage peuvent former, en se déplaçant, des champs électriques supérieurs au seuil de claquage de l'air, le champ au-delà duquel l'air perd ses propriétés isolantes et devient conducteur. L'air peut alors s'ioniser et une décharge s'amorce, formant un canal d'air ionisé. Lorsque celui-ci atteint le sol, une impulsion de courant le parcourt, chauffant l'air jusqu'à 30 000 °C, ce qui produit la lumière de l'éclair (voir l'encadré page 52).

Les premières observations de sylphes ont suscité un élan extraordinaire de la communauté scientifique internationale. Il est vite apparu que des caméras placées dans les zones montagneuses pouvaient enregistrer les sylphes à des distances de plusieurs centaines de kilomètres au-dessus des zones orageuses pendant la nuit.

Sylphes, elfes, trolls, jets bleus...

De nombreux sylphes et d'autres phénomènes lumineux ont été observés par l'équipe américaine de Walter Lyons, qui effectuait chaque année des campagnes d'observation des orages dans les hautes plaines du Colorado. D'autres observations effectuées au Japon, en Australie, au Brésil, en Chine ont montré que ces phénomènes se produisent au-dessus de la plupart des systèmes orageux de grande taille et sont plus fréquents qu'on ne l'avait imaginé. Ainsi plus de 400 sylphes en une nuit ont été observés au-dessus d'un orage en Argentine. En 2000, nous avons effectué les premières observations en Europe à partir du pic du Midi. Plus récemment, des observations ont été faites depuis le Massif central, les montagnes corses, l'Italie, l'Espagne et plusieurs pays d'Europe centrale.

Ces observations ont permis d'identifier une variété importante de phénomènes

LES AUTEURS



Elisabeth BLANC et Thomas ARGÈS sont géophysiciens à la Direction des applications militaires du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) à Arpajon.

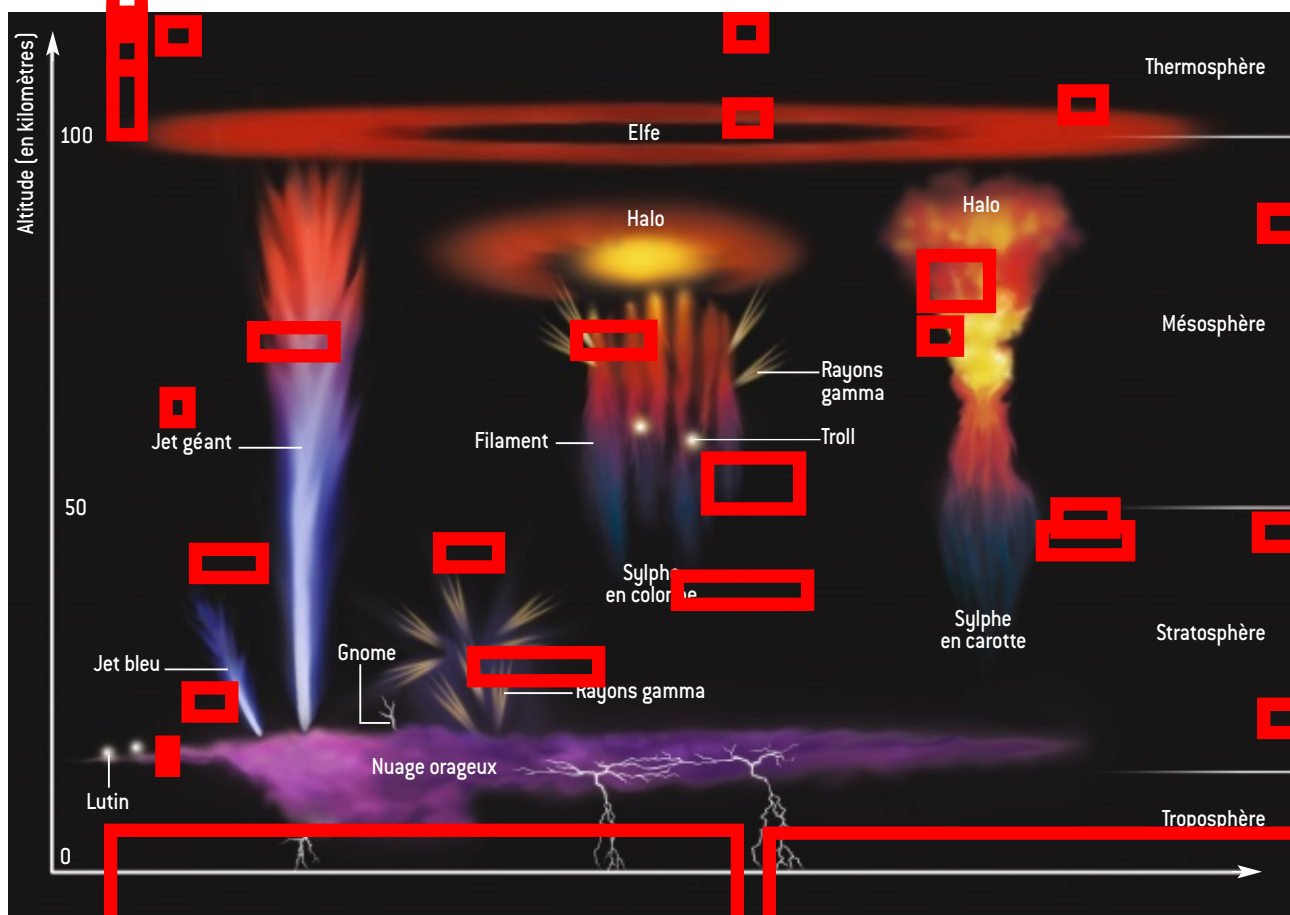
✓ SUR LE WEB

Le blog des observations en Europe d'émissions lumineuses transitoires au-dessus des orages : eurosprite.blogspot.fr

lumineux au-dessus des orages. Les sylphes durent quelques millisecondes et s'étendent de 30 kilomètres au-dessus des nuages jusqu'à 90 kilomètres d'altitude environ. Ils apparaissent souvent en groupes. Certains ont une forme de carotte : un halo diffus, entre 70 et 85 kilomètres d'altitude, s'étend latéralement sur une distance de l'ordre de 10 à 70 kilomètres et se prolonge vers le bas par des structures en filaments. D'autres forment des colonnes qui semblent parfois se grouper en cercles. Les sylphes apparaissent généralement après les éclairs dits positifs – des éclairs qui, en fin d'orage, conduisent vers le sol des charges positives. Les halos peuvent aussi apparaître seuls.

Les sylphes ne sont pas seulement lumineux. Notre équipe a montré en reliant des enregistrements acoustiques à des images de sylphes que ces derniers s'accompagnent d'ondes acoustiques de basses fréquences – des infrasons –, parfois pen-

dant plusieurs dizaines de secondes. Très longs par rapport à la durée d'émission lumineuse des sylphes (quelques millisecondes), ces temps correspondent à celui que met le son pour parcourir l'étendue horizontale des sylphes (la vitesse du son est d'environ 330 mètres par seconde). Ces infrasons sont plus longs que les sons émis par les éclairs, qui ne durent que quelques secondes. Ils sont cependant produits selon le même principe : tout le long de la décharge qui forme les filaments des sylphes, l'air s'échauffe de un ou deux degrés seulement, mais dans un volume énorme – une dizaine de milliers de kilomètres cubes et, par conséquent, se dilate, ce qui produit des ondes de choc. Nous avons détecté les infrasons des sylphes jusqu'à des distances de l'ordre de 1 000 kilomètres, tandis que les sons produits par les éclairs (le tonnerre), de fréquences supérieures, ne sont audibles que jusqu'à 50 kilomètres environ.



1. UN ORAGE ET SES DIFFÉRENTES ÉMISSIONS : les éclairs, les événements lumineux transitoires (jets, sylphes, elfes, trolls, lutins, gnomes) et les flashes gamma d'origine terrestre. La plupart des événements lumineux transitoires sont émis à la suite des décharges électriques qui se produisent dans les nuages d'orage. Juste au-dessus, jusqu'à 40 kilomètres d'altitude, on observe des jets bleus qui, parfois, se prolongent jusqu'à la base de l'ionosphère (jets géants). Entre 40 et 85 kilomètres d'altitude,

des sylphes se forment à haute altitude dans des halos et se prolongent vers le sol par des filaments. Diverses formes sont observées, notamment selon la qualité de l'enregistrement. À la base de l'ionosphère (atmosphère supérieure, entre 50 et 600 kilomètres), enfin, apparaissent les elfes – les plus nombreux de ces événements. Les trolls, lutins et gnomes sont des émissions trop rares pour être étudiées. Des flashes gamma d'origine terrestre sont également détectés au-dessus des orages.

D'autres phénomènes lumineux ont été observés à diverses altitudes. Les elfes sont des disques lumineux qui s'étendent horizontalement sur plusieurs centaines de kilomètres à des altitudes de l'ordre de 90 kilomètres et à une vitesse proche de celle de la lumière. Plus nombreux que les sylphes, les elfes apparaissent après tous les types d'éclairs. Ils éclairent moins d'une milliseconde.

Les jets bleus surgissent au sommet des nuages sous la forme de cônes étroits durant environ 100 millisecondes. La plupart s'arrêtent à 40 kilomètres d'altitude environ, mais certains jets, dits géants, forment une connexion électrique directe entre le nuage de l'orage et la base de l'ionosphère.

Une ionisation locale de l'ionosphère

Toutes ces émissions n'agissent pas de la même façon sur l'atmosphère, ce qui renseigne sur leurs propriétés énergétiques : les filaments des sylphes et les jets géants chauffent, voire ionisent l'atmosphère qu'ils traversent, les elfes ionisent, la base de l'ionosphère lors de leur formation, tandis que les halos restent sans effet. Ces derniers sont donc des émissions lumineuses moins énergétiques.

Les sylphes, les jets et les elfes sont les structures les plus fréquemment observées – et les plus faciles à voir, car elles sont suffisamment éloignées des nuages orageux pour ne pas être masquées par la lumière des éclairs. Des systèmes semi-automatiques peuvent ainsi en enregistrer à plusieurs centaines de kilomètres à l'horizon. Toutefois, il existe aussi d'autres émissions de plus petite taille dans la partie inférieure des filaments des sylphes et au sommet des nuages. Nommées *sprites*, *trails* ou *lutsins*, ces émissions ne peuvent faire l'objet d'une observation systématique du fait de leur proximité des orages.

En analysant les caractéristiques des différentes émissions (altitude, durée, spectre, forme, etc.), diverses équipes, dont la nôtre, commencent à élucider certains mécanismes intervenant dans leur formation. Les elfes font partie des phénomènes les mieux compris. Ils se produisent après tous les éclairs dépassant un certain seuil énergétique. Ces éclairs engendrent une impulsion électromagnétique très intense qui se propage jusqu'à l'ionosphère et chauffe les électrons ambiants de l'ionosphère inférieure. Accélérés par le



2. UN JET GÉANT observé lors d'un orage sur l'île de La Réunion.

chauffage, les électrons acquièrent une énergie cinétique suffisante pour interagir avec les molécules de l'air, ce qui produit une émission lumineuse et une ionisation locale de l'atmosphère : chaque molécule d'air ionisée produit un ou deux électrons, qui ionisent à leur tour les molécules d'air voisines, etc. Cette ionisation locale de l'atmosphère persiste pendant plusieurs dizaines de secondes.

La forme des elfes – un disque de lumière qui s'élargit – est sans doute due au fait que, les molécules d'air se raréfiant dans les couches supérieures de l'ionosphère, les réactions de proche en proche entre les électrons et les molécules de l'air restent principalement cantonnées dans la couche inférieure de l'ionosphère.

Les jets s'expliquent seulement par la présence des champs électrostatiques de l'orage. Les jets géants peuvent être comparés à des décharges reliant directement le nuage et l'ionosphère au lieu du sol comme on le voit pour un éclair classique.

Les sylphes, quant à eux, ne se produisent qu'après les éclairs positifs. Ces éclairs

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Tavani *et al.*, Terrestrial gamma-ray flashes as powerful particle accelerators, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 106, 018501, 2011.

E. Blanc, Space observations of transient luminous events and associated emissions in the upper atmosphere above thunderstorm areas, *C. R. Geoscience*, vol. 342, pp. 312-322, 2010.

T. Neubert *et al.*, Documentation of electric discharges in the mesosphere, *Surv. Geophys.*, vol. 29, pp. 1-127, 2009.

J. Dwyer, Les éclairs radiographiés, *Pour la Science*, n° 332, pp. 80-87, 2009.

apparaissent à la fin de gros orages : partant de la région supérieure du nuage, chargée positivement, des particules positives sont attirées par une région du sol chargée négativement. Après un éclair positif, des charges négatives persistent dans le nuage. Ces charges produisent un champ électrique transitoire à des altitudes supérieures à celle du nuage. Ce champ électrique pourrait être responsable de l'apparition des halos, la partie supérieure des sylphes. Voyons comment.

Lorsque le champ électrique des orages pénètre dans les couches supérieures de l'atmosphère, il diminue avec l'altitude mais moins vite que le seuil de claquage de l'air. Ainsi, à une certaine altitude (environ 70 kilomètres) qui dépend de divers facteurs, notamment l'humidité de l'air, le champ électrique engendré par l'orage dépasse le seuil de claquage de l'air. L'air à cette altitude devient conducteur, et le champ électrique de l'orage y produit des courants qui l'échauffent – des décharges –, entraînant des émissions lumineuses. Pour la majorité des sylphes, on a ainsi mesuré des variations du moment de charge (une grandeur qui rend compte à la fois de la charge neutralisée dans le nuage et de la hauteur de la décharge) supérieures à 300 coulombs · kilomètres, que l'on ne rend compte que pour les éclairs les plus nuis-

sants. Ces courants confirment que la formation des sylphes est liée à des modifications importantes de la conductivité dans l'atmosphère moyenne et supérieure.

Les sylphes sont souvent observés plusieurs dizaines de millisecondes après l'éclair positif, car il s'effectue souvent un transfert de charges sur des distances importantes à l'intérieur du nuage. Les sylphes sont ainsi la plupart du temps décalés latéralement de plusieurs kilomètres de l'éclair positif qui les a déclenchés.

Une avalanche d'électrons ?

Dès les années 1920, le physicien écossais et prix Nobel Charles Wilson avait prédit que les électrons pouvaient être suffisamment accélérés au-dessus des orages pour dépasser le seuil de claquage de l'air et provoquer de tels phénomènes. Toutefois, aux altitudes inférieures à 70 kilomètres, notamment aux altitudes des nuages (4-15 kilomètres), ce n'est loin d'être le cas. Les champs électriques ne sont pas suffisants pour atteindre le seuil de claquage conventionnel. Par exemple, les champs électriques mesurés par ballon dans les nuages par Peter Marshall, de l'Université Stanford aux États-Unis, atteignent 100 à 200 kilovolts par mètre, alors que le seuil de claquage conventionnel dépasse un

mégavolt par mètre à l'altitude des nuages. Comment, alors, expliquer la partie inférieure des sylphes ?

En 1956, Robert Roussel-Dupré, du Laboratoire de Los Alamos, aux États-Unis, et Alexander Gurevich, de l'Institut de physique de Moscou, ont proposé d'expliquer ces phénomènes par une avalanche d'électrons dits relativistes, c'est-à-dire très énergétiques. Au-dessus d'un seuil de l'ordre de 100 kiloelectronvolts, les électrons gagnent plus d'énergie *via* le champ électrique des orages qu'ils n'en perdent par interaction avec l'air. Ces électrons sont alors accélérés vers le haut par le champ électrique intense de l'orage. Ils arrachent des électrons aux molécules d'air, qui eux-mêmes sont accélérés, entrent en interaction avec d'autres molécules d'air et produisent une avalanche d'électrons de haute énergie.

Pour provoquer la formation de décharges, ce mécanisme nécessite un champ électrique dix fois moins intense que le seuil de claquage de l'air sec – une valeur compatible avec celle des champs mesurés lors des orages – à condition que des électrons atteignent des énergies suffisantes pour déclencher l'avalanche ! En fait, un seul électron de haute énergie est suffisant pour amorcer ce mécanisme. Un tel électron pourrait être produit par la collision d'un rayon cosmique avec les molécules de l'air. Ces particules de haute énergie, provenant

ECLAIRES NÉGATIFS ET ECLAIRES POSITIFS

Lors d'un orage, les nuages ont généralement une structure électrique tripolaire avec des charges négatives au milieu du nuage et des charges positives dans leurs parties supérieure et inférieure mais à faible densité (des hydrométéores positifs légers, tels les cristaux de glace, montent plus haut dans le nuage que d'autres plus lourds et négatifs). Le sol au-dessous du nuage se charge positivement. Des décharges au sein du nuage – des circulations rapides de charges électriques créant un courant – amorcent les éclairs nuage-sol (elles-mêmes pourraient être déclenchées par les rayons cosmiques). Guidées par le champ électrique entre le nuage et le sol, les décharges forment un « canal » ionisé jusqu'au sol en se propageant par bonds et en ionisant des molécules d'air. Dès que le canal atteint le sol, le courant s'écoule à court le canal du sol vers le nuage. Le courant échauffe l'air, qui produit de la lumière, nommée arc en retour, et le tonnerre.

Les éclairs sont dits négatifs quand leur canal est ionisé par des particules négatives



(électrons). Les éclairs positifs, quant à eux, ramènent des charges positives de la partie supérieure des nuages vers le sol. Les éclairs négatifs représentent environ 90 pour cent des éclairs nuage-sol. Les éclairs positifs se produisent en général à la fin des systèmes orageux.

En réorganisant les charges du nuage, les éclairs modifient les champs électrostatiques entre

les différentes régions chargées du nuage et engendrent un champ électrostatique au-dessus du nuage : l'éclair réorganise les charges du nuage, ce qui produit un champ électrostatique entre le nuage et l'ionosphère dirigé vers le bas pour les éclairs positifs et vers le haut pour les éclairs négatifs. Si ce champ est suffisamment intense, il est susceptible de déclencher des décharges qui se déplacent vers le bas depuis la mésosphère.

notamment du Soleil, bombardent en permanence l'atmosphère terrestre.

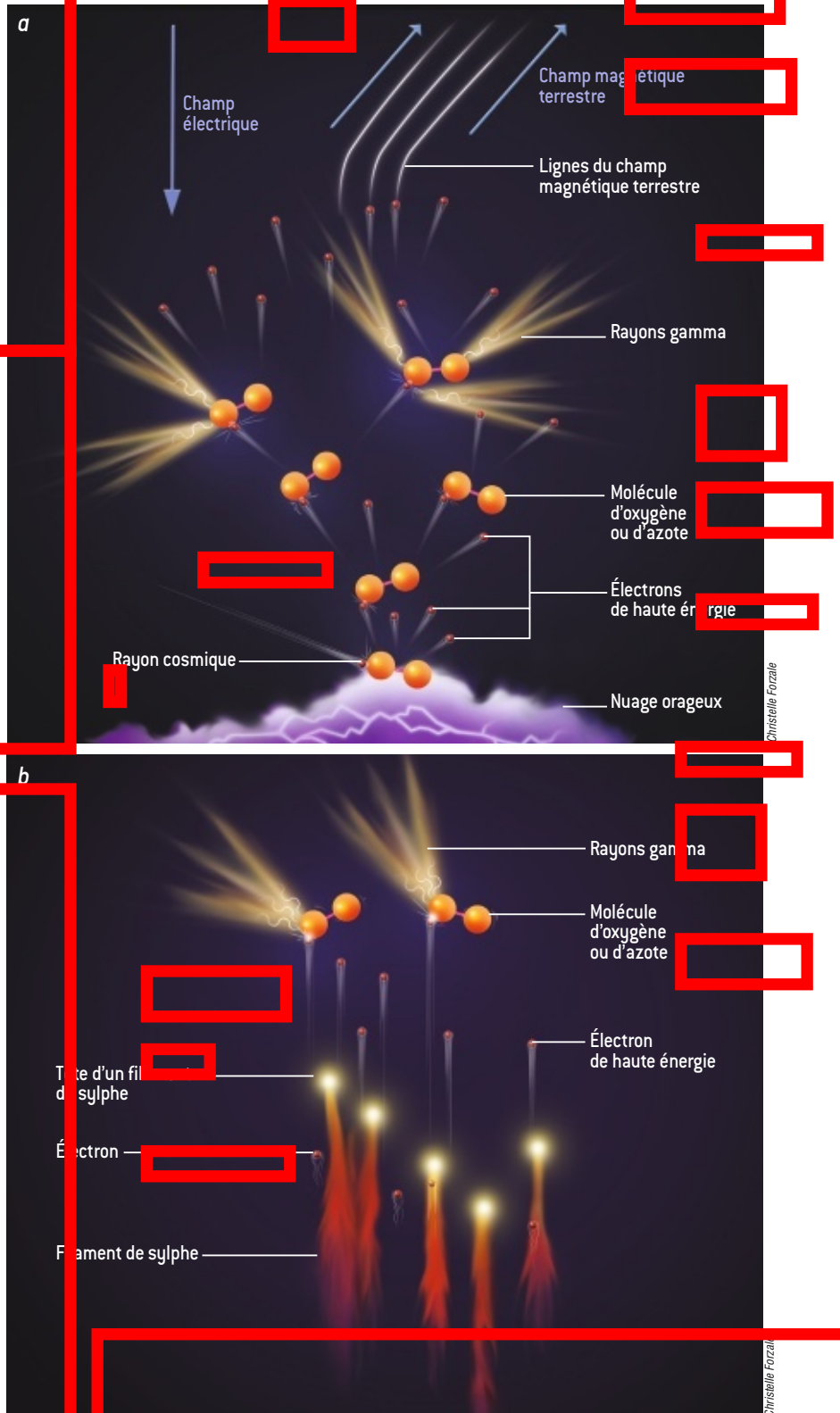
Par ailleurs, la théorie montre qu'une telle avalanche d'électrons ne s'arrête pas dans l'atmosphère supérieure. Les électrons sont accélérés vers le haut jusqu'à l'ionosphère et la magnétosphère, où ils se propagent en suivant les lignes du champ magnétique terrestre. Ils peuvent ainsi se propager jusqu'au point magnétique conjugué de celui de l'orage (l'autre bout de la ligne du champ magnétique), situé dans l'autre hémisphère de la Terre. De fait, on détecte parfois des émissions au point magnétique conjugué des orages (nous y reviendrons).

Ce mécanisme n'est pas restreint à l'atmosphère terrestre ; il pourrait se produire sur d'autres planètes. Les structures lumineuses transitoires en forme de lignes droites parfois observées dans les anneaux de Saturne pourraient être dues à de telles avalanches, déclenchées lorsque les anneaux sont magnétiquement liés aux zones orageuses. Une autre planète candidate est Jupiter, où des émissions radio produites par les éclairs ont été détectées ainsi que des flashes lumineux.

Des perles lumineuses ultrarapides

Aujourd'hui, des observations plus précises des sylphes à l'aide de caméras ultrarapides permettent de préciser ce modèle. En 2007, les séquences enregistrées à la cadence de 10 000 images par seconde par l'équipe de Hans Stenbaeck Nielsen, de l'Université d'Alaska, ont montré que les sylphes sont engendrés par des structures complexes qui se forment à 75 kilomètres environ. Des perles lumineuses apparaissent et tombent à une vitesse de 10 000 kilomètres par seconde, laissant chacune une traînée lumineuse – un filament vertical qui se développe vers le bas. Ces structures sont suivies d'autres filaments partant vers le haut et dont la forme est plus diffuse. Ces perles sont la manifestation d'une ionisation plus intense à la tête des filaments. Quand on cumule ces images afin de revenir à la cadence vidéo plus lente des premières observations, on retrouve la partie supérieure diffuse et les filaments qui en émergent vers le bas en donnant aux sylphes la forme de carottes.

Ces filaments sont des canaux de plasma, c'est-à-dire de gaz ionisé, qui se



3. LES FLASHS GAMMA D'ORIGINE TERRESTRE de basse altitude seraient produits par une avalanche d'électrons relativistes (a) : en ionisant une molécule d'air au-dessus du nuage, un rayon cosmique [une particule énergétique provenant de l'espace] libère des électrons qui frappent à leur tour des molécules d'air, créant une avalanche d'électrons énergétiques dont les collisions avec les molécules d'air produisent des rayons gamma. Entraînés le long des lignes du champ magnétique terrestre, des électrons de l'avalanche produisent aussi des effets observables dans l'autre hémisphère. Les flashes gamma de haute altitude seraient produits lors de collisions, au-dessus des nuages, d'air, d'électrons accélérés dans les têtes des filaments des sylphes (b).

propagés dans l'atmosphère non ionisée sous l'effet des champs électriques intenses produits par l'éclair parent. Le champ électrique à leur tête s'intensifie, comme cela peut être obtenu dans les décharges en laboratoire. Ils peuvent alors produire des branches formant la structure des sylphes.

Pour le moment, aucune théorie n'est capable d'expliquer la diversité des phénomènes lumineux. La théorie de l'avalanche, notamment, n'explique pas la formation de filaments vers le bas. Néanmoins, elle fournit des explications tout à fait plausibles d'autres phénomènes, telles certaines émissions radio détectées jusqu'à des distances de plusieurs centaines de kilomètres de la zone orageuse ou, nous allons le voir, l'émission de certains flashes gamma d'origine terrestre.

Les flashes gamma d'origine terrestre ont été détectés par hasard en 1994, par un satellite dédié à la mesure des rayons gamma dans l'espace, le satellite CGRO (*Compton Gamma-Ray Observatory*). À l'époque, seuls 76 événements de ce type ont été mesurés pendant les neuf ans de la mission, mais l'enregistrement des flashes gamma d'origine terrestre n'était pas l'objectif premier du module expérimental du satellite, l'instrument BATSE (*Burst and Transient Source Experiment*). Lancé en 2002, le satellite RHESSI (*Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager*), destiné à des observations solaires, en a détecté beaucoup plus : il a mesuré 11 à 20 flashes gamma d'origine terrestre par mois. Leur spectre en énergie peut atteindre 30 mégaélectronvolts.

À leur découverte, les flashes gamma d'origine terrestre ont été naturellement reliés aux événements lumineux transitoires et il a été suggéré que les rayons gamma pourraient résulter de l'interaction avec l'atmosphère de particules de haute énergie de l'avalanche invoquée pour expliquer les sylphes.

Cependant, plusieurs énigmes subsistent. Tout d'abord, l'altitude à laquelle les flashes gamma d'origine terrestre se produisent reste mystérieuse. Plusieurs études du spectre énergétique des flashes gamma d'origine terrestre enregistrés par le satellite RHESSI, complétées de simulations, ont suggéré qu'ils avaient été produits dans la partie supérieure des nuages, soit à des altitudes inférieures à 20 kilomètres d'altitude, et non à l'altitude où apparaissent les sylphes. En effet, les basses énergies du spectre des flashes gamma d'origine terrestre sont atténuées, signe qu'elles ont été absorbées avant leur détection par le satellite, c'est-à-dire lors de leur passage dans l'atmosphère (à l'inverse, les basses énergies de rayons gamma émis à une altitude supérieure à 20 ou 30 kilomètres ne seraient pas atténuées, l'atmosphère étant plus ténue).

Des émissions gamma au-dessus des orages

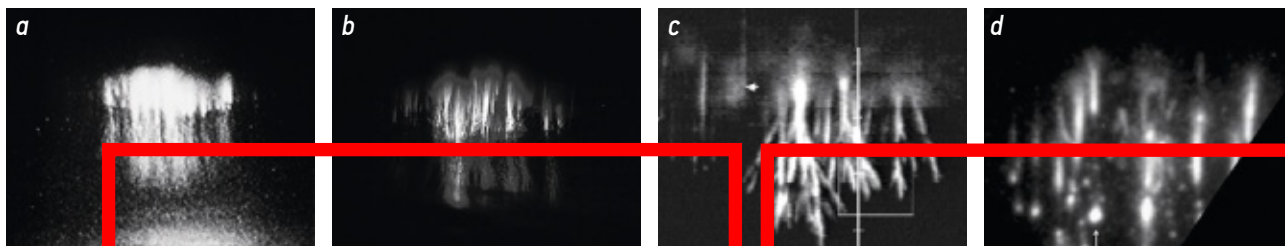
Les flashes gamma d'origine terrestre pourraient donc être produits par les éclairs et les décharges qui surviennent au sommet ou au-dessus des nuages plutôt que par les sylphes eux-mêmes. Ce que corrobore une expérience réalisée par l'équipe de Joseph Dwyer, de l'Institut de technologie de Floride : les physiciens ont produit des flashes gamma en déclenchant artificiellement des éclairs. Le mécanisme de l'avalanche pourrait expliquer la formation de tels flashes gamma au sommet des nuages.

Les observations confirment également qu'il se produit des effets au point magnétique conjugué des orages – un des effets attendus avec le modèle de l'avalanche. Un flash gamma d'origine terrestre a été observé par le satellite RHESSI au-dessus du Sahara. Ce flash gamma – le plus

long et le plus intense jamais détecté – a été observé alors qu'il n'y avait pas d'orage au Sahara, mais qu'un orage se produisait... au point magnétique conjugué. Des électrons se seraient propagés le long des lignes du champ magnétique et auraient frappé le satellite. Une nouvelle analyse des données de RHESSI a révélé d'autres événements de ce type, et plusieurs flashes gamma d'origine terrestre observés par le satellite CGRO pourraient aussi entrer dans cette catégorie. Il existerait ainsi deux classes de flashes gamma d'origine terrestre : les premiers, brefs et nombreux, seraient directement émis au-dessus des orages (par les éclairs ou par les sylphes) tandis que les seconds, plus longs et plus intenses, seraient produits par des électrons qui se seraient propagés le long des lignes du champ magnétique terrestre.

Et pour brouiller encore les pistes, des observations au sol effectuées lors des orages japonais d'hiver ont révélé que des émissions gamma ont été produites à la base de nuages orageux pendant plusieurs dizaines de secondes sans qu'il n'y ait eu d'éclair préalable. Les simulations indiquent que le mécanisme d'avalanche serait la cause de ces émissions.

Et ce n'est pas tout ! En janvier 2011, le satellite italien AGILE a détecté, lors de certains flashes gamma d'origine terrestre, des énergies atteignant 100 mégaélectronvolts – des énergies trop hautes pour être expliquées par le modèle d'avalanche d'électrons. Comment ces rayons gamma apparaissent-ils ? Les récentes simulations de Victor Pavlenko, de l'Université de Pennsylvanie, fournissent une nouvelle explication. Le physicien a montré qu'il se produit des accélérations très importantes d'électrons à la tête des filaments qui forment la structure des sylphes. Ces électrons auraient une énergie cinétique suffisante (ils peuvent être accélérés jusqu'à des énergies de l'ordre de dix mégaélectronvolts)



4. DIVERSES PHOTOGRAPHIES DE SYLPHES montrant l'amélioration de la résolution au fil des ans. Les premiers films de sylphes (a), réalisés avec des caméras classiques – au temps de pose supérieur à la durée du phénomène –, montraient le phénomène dans son ensemble. Avec le temps, ces observations ont été réalisées au télescope pour mieux

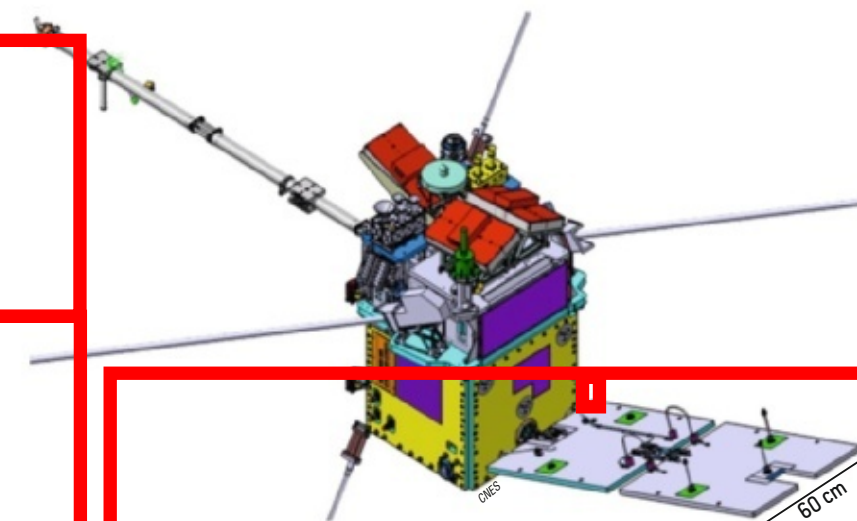
décrire la géométrie des filaments (b), ou avec des caméras de plus en plus rapides (c). Les observations récentes, qui combinent ces deux avantages, montrent les sylphes comme des boules lumineuses de plusieurs dizaines de mètres de diamètre émergeant d'hétérogénéités présentes dans le halo (d).

pour déclencher des flashes gamma de haute énergie. De tels processus pourraient être des sources alternatives des flashes gamma d'origine terrestre observés pendant les orages, qu'ils soient déclenchés dans les filaments ionisés des sylphes ou dans les éclairs. Reste à le vérifier... et à comprendre comment des électrons atteignent de telles énergies.

Enfin, toujours en janvier 2011, le télescope spatial de rayonnement gamma *Fermi* a détecté des flashes gamma d'origine terrestre de 511 kiloelectronvolts – une énergie qui correspond très exactement à celle des photons produits lors de la collision et l'annihilation d'un électron et de son antiparticule, le positron. Cette découverte suggère que les orages engendrent la formation... d'antiparticules. L'avalanche d'électrons émet tellement de flashes gamma lors des collisions avec les molécules de l'air que suffisamment de paires électron-positron sont produites lors de l'interaction des rayons gamma avec les molécules de l'air pour que leur signature – le rayon gamma fruit de leur annihilation – soit détectée par le satellite.

Jusqu'à présent, tant pour l'étude des événements lumineux transitoires que pour celle des flashes gamma d'origine terrestre, on s'est contenté de données partielles – des observations d'un aspect particulier parfois au détour d'une expérience visant d'autres objectifs. Pour mieux comprendre les mécanismes en jeu, notre équipe a proposé, dès 1998, d'effectuer des observations simultanées, depuis l'espace, de l'ensemble des émissions, ce qui représente un défi, car, vu de l'espace, les sylphes se superposent aux éclairs d'orage qui saturant les caméras.

La première expérience d'observation de sylphes par satellite, lancée en 2004 pour cinq ans, était limitée à des observations optiques à l'horizon. Placée à bord du satellite taïwanais FORMOSAT 2, ISUAL a détecté de nombreux elfes, sylphes, halos et jets géants, dont la distribution géographique a été établie. Les elfes ont été principalement observés au-dessus des océans dont la température dépasse 26 °C, alors que les sylphes se produisent plutôt au-dessus des continents. La formation des elfes sera favorisée par la température élevée de certaines zones océaniques : cette température provoque des phénomènes de convection verticale qui favorisent les éclairs intenses, lesquels entraînent à leur tour la formation des elfes.



5. LE MICRO-SATELLITE TARANIS est équipé de différents instruments pointés vers le sol qui enregistreront en parallèle les événements lumineux transitoires, les flashes gamma d'origine terrestre ainsi que les particules énergétiques venant des basses couches atmosphériques. Actuellement en construction (le lancement est prévu pour 2015), le satellite couvrira une très large gamme spectrale (rayons gamma, rayons X, ultraviolet, visible, proche infrarouge et radio).

Le projet TARANIS du programme *Myriade* du CNES, proposé par des équipes du CNRS et la nôtre, a pour objectif la mesure simultanée des flashes gamma d'origine terrestre, des événements lumineux transitoires, des émissions radio et des électrons de haute énergie à partir du même microsatellite. Nous pourrions ainsi, d'une part, décrire les mécanismes de déclenchement et, d'autre part, déterminer leur fréquence et leur impact sur l'environnement terrestre. Ces mesures doivent être effectuées depuis l'espace, car l'atténuation des flashes gamma d'origine terrestre dans l'atmosphère les rend difficilement observables du sol.

La mission TARANIS

Pour surmonter la difficulté d'observer les sylphes au-dessus des orages, nous avons proposé d'utiliser deux caméras, filmant l'une les éclairs à une fréquence correspondant à une raie d'émission des éclairs et l'autre les sylphes à une fréquence correspondant à une raie d'émission des sylphes. Il n'est pas possible de séparer les raies d'émission des sylphes et des éclairs, car elles sont produites par les mêmes molécules (l'azote et l'oxygène de l'atmosphère). Néanmoins, on peut les distinguer en observant les sylphes dans une raie d'émission (environ 762 nanomètres) correspondant à une bande d'absorption de l'atmosphère due au dioxygène. Dans cette raie, les émissions des éclairs sont d'avantage atténuées que celles des sylphes qui se produisent à plus haute altitude (où il y a moins d'oxygène). En utilisant deux caméras, l'une qui se trouve dans cette

bande et une autre qui privilégie les éclairs, il est possible de séparer, par traitement au sol, la réponse des sylphes de celle des éclairs. Ce procédé a été validé par l'expérience LSO (*Lightning and Sprite Observations*) menée dans les années 2001 à 2004 par Claude Haigneré et d'autres astronautes de l'Agence spatiale européenne sur la Station spatiale internationale.

Actuellement en construction, le satellite TARANIS doit être lancé en 2015. Sa charge utile inclut des instruments optiques, des détecteurs d'électrons de haute énergie, des antennes électriques et magnétiques couvrant une gamme de fréquences très étendue et trois détecteurs de rayons X et gamma.

Bénéficiant d'un mode d'observation des événements transitoires à haute résolution et d'un mode de surveillance fonctionnant en continu, TARANIS pourra caractériser l'ensemble des phénomènes à toutes les échelles temporelles possibles.

D'autres projets spatiaux, également en phase de construction, ont des objectifs similaires : le projet ASIM vise à observer les flashes gamma d'origine terrestre et les événements lumineux transitoires sur la Station spatiale internationale en liaison avec les paramètres climatiques, tandis que le projet GLIMS, également depuis la Station spatiale internationale, dispose de dispositifs optiques pour observer les événements lumineux transitoires tout en mesurant simultanément des émissions radio de très haute fréquence.

Les prochaines années devraient ainsi fournir les observations nécessaires pour mieux comprendre ces aspects nouveaux de l'activité orageuse, ainsi que les émissions variées sur l'environnement. ■

Cinéma

La conquête de la 3D

Depuis quelques années, les films en trois dimensions remportent un franc succès.

Comment recrée-t-on l'illusion du relief à partir d'images projetées sur un écran bidimensionnel ?

Thierry Berel

ne pense pas qu'il y ait un sujet de film qui ne puisse pas absorber la 3D, qui ne puisse pas tolérer l'ajout de la profondeur comme technique de narration

Martin Scorsese

Après plusieurs tentatives infructueuses dans les années 1950 et 1980, le cinéma en trois dimensions est de retour depuis le milieu des années 2000. Cette fois, grâce à l'emploi de technologies numériques, le succès est au rendez-vous. La plupart des histoires peuvent se raconter en 3D, mais le passage à ce format n'est pas une simple évolution, comme le fut la transition du noir et blanc à la couleur ; d'une part, c'est une nouvelle façon de faire vivre les émotions et de raconter une histoire et, d'autre part, un contenu 3D peut susciter une gêne physiologique chez le spectateur. Créer et restituer un contenu 3D de qualité implique alors de respecter un certain nombre de règles, tant sur le plan de la technique que du scénario.

Après un bref historique du domaine, nous présenterons toute la chaîne de l'image, du tournage à la projection dans les salles de cinéma. Nous verrons aussi la télévision en relief et la 3D sans lunettes.



Précisons d'abord ce qu'est la 3D. Pour les amateurs de jeux vidéo, il s'agit d'une représentation d'un monde à trois dimensions où l'on peut se déplacer, mais dont on observe une projection sur un écran à deux dimensions. Cette technique est aussi utilisée dans les films d'animation numériques et dans les systèmes de conception assistée par ordinateur. Il n'y a pas d'effet de relief ni de jaillissement d'objets hors de l'écran.

Nous nous intéressons ici à la visualisation en trois dimensions, aussi nommée stéréoscopie 3D (S-3D), qui crée des effets de profondeur. Dans le monde réel, chaque œil voit une même scène sous un angle légèrement différent, et le cerveau reconstitue le relief à partir de ces images un peu décalées. La stéréoscopie 3D reproduit ce phénomène, en projetant des images légèrement différentes sur chaque œil. Cette idée n'est pas nouvelle. Les premières expériences de cinéma stéréoscopique datent de plus d'un siècle, avec un procédé nommé

anaglyphie inventé par le Français Louis Ducos du Hauron en 1891 : deux images différentes d'une même scène, respectivement rouge et verte, sont projetées sur un écran, tandis que le spectateur porte des lunettes ayant deux verres de couleurs différentes (rouge et verte). Ce procédé est utilisé jusqu'à dans les années 1950, première période phare du cinéma en relief.

Engouement, puis la désillusion

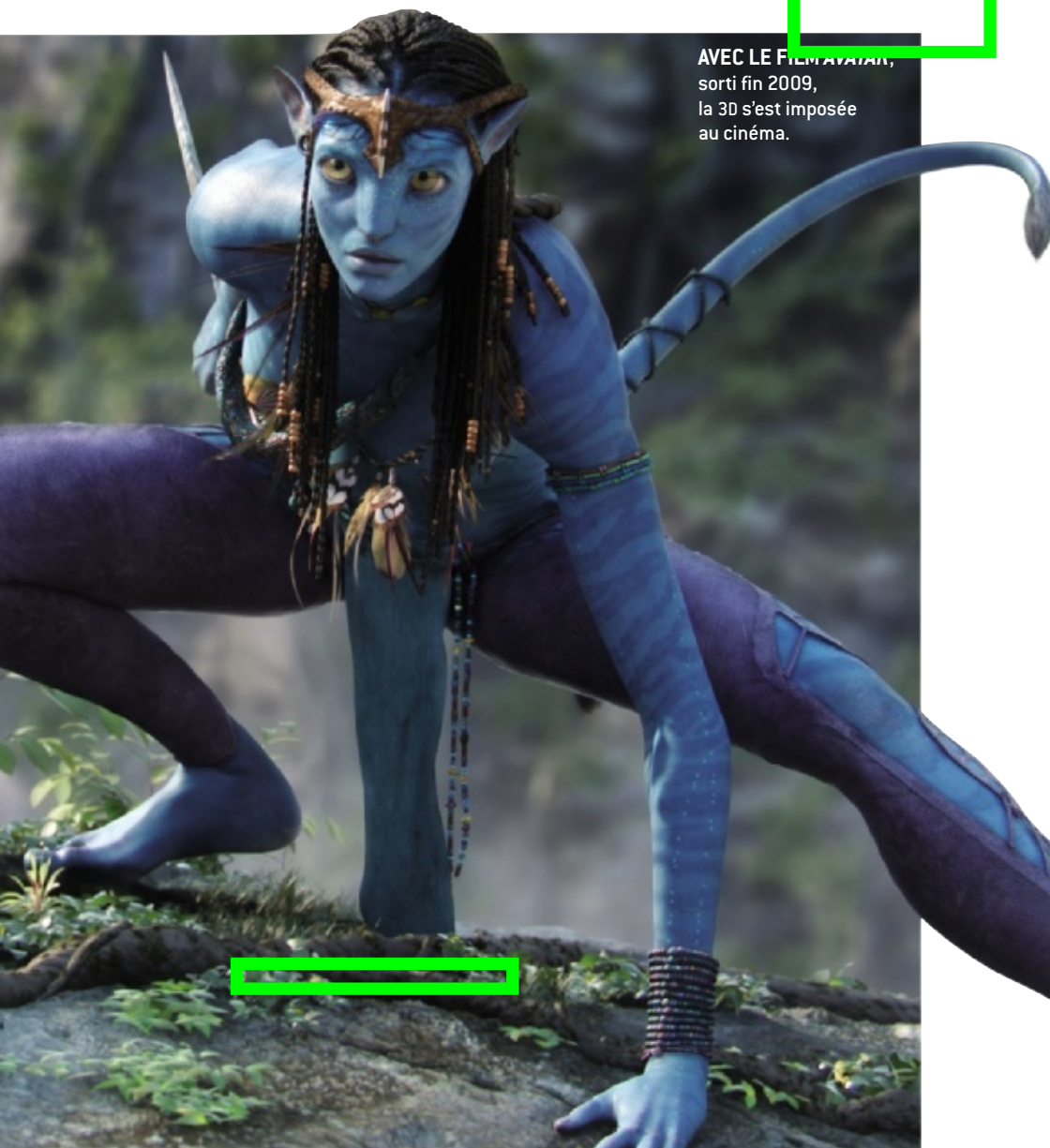
À cette époque, un nouveau procédé, fondé sur des lunettes polarisées, est introduit : les images gauches et droites ne sont plus de couleurs différentes, mais leur lumière a une polarisation spécifique (une orientation particulière du champ électrique) et les verres placés devant chaque œil sont des filtres polarisés.

À Hollywood, le cinéma en relief suscite un engouement, mais bref. Les images gauches et droites, projetées par deux appa-

reils différents, doivent être parfaitement superposées et synchronisées sur l'écran, car tout décalage provoque des maux de têtes ou des nausées. Mais le jeu mécanique dans les projecteurs rend ces deux contraintes irréalisables. En outre, la prolifération de créatures plus ou moins monstrueuses jaillissant de l'écran accentue la fatigue oculaire du spectateur.

En raison de ces problèmes, le cinéma 3D ne réussit pas à percer. Il ne reviendra sur le devant de la scène que dans les années 1970-1980, principalement avec la technique des lunettes polarisées ; mais là encore, les spectateurs ressentent de l'inconfort et les films ne rencontrent pas le succès espéré. La 3D se ramène alors vers les parcs d'attraction, où les séances ne durent que quelques minutes, de sorte que la fatigue visuelle n'a pas le temps de se faire sentir.

Le changement déterminant sera l'arrivée du cinéma numérique dans les années 2000. Celui-ci permet de n'utiliser qu'un seul appareil pour projeter les deux



AVEC LE FILM AVATAR, sorti fin 2009, la 3D s'est imposée au cinéma.

L'ESSENTIEL

- ✓ Chacun de nos yeux voit une même scène sous un angle distinct. Le cerveau reçoit donc deux images différentes, à partir desquelles il recrée une représentation en relief.
- ✓ Pour tourner un film en trois dimensions, on utilise alors deux caméras, afin d'enregistrer une vue distincte pour chaque œil.
- ✓ Différentes techniques de projection permettent ensuite de présenter à chaque œil uniquement la vue qui lui est destinée.
- ✓ Un certain nombre de règles doivent être respectées, sinon les spectateurs ressentent des fatigues visuelles, des maux de tête et des nausées.

© 20th Century Fox

L'AUTEUR



Thierry BOFFEL est ingénieur de recherche pour la Société Technicolor, à Cesson-Sévigné, en Bretagne, et membre du Programme d'excellence 3D de cette société.

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. Routhier, *Leaving the road to 3D TV viability*, Screen Plays, 2011.
www.screenplays-digital.com/screenplays/2011/09?pg=21#pg21

C. Vienne *et al.*, *Eye movements during vergence effort in stereoscopic ocular pursuit task and their relations to visual fatigue and stereopsis*, Vision Science Society annual meeting, 2011.

L. Blondé *et al.*, *3D stereo rendering challenges and techniques*, Conference on information science and systems, 2010.

L. Lipton, *Foundations of the Stereoscopic Cinema*, Van Nostrand Reinhold Inc., 1982.

images – nous y reviendrons. Le premier succès de la 3D, *Chicken Little*, des studios Disney, sort en 2005, mais il faudra attendre *Avatar* de James Cameron, fin 2009, pour que la 3D déclenche un réel engouement. Le cinéma d'animation contribue notablement au déploiement rapide de la 3D : les trois quarts des films 3D des années 2000 en sont issus. Les images créées par ordinateur sont techniquement parfaites, notamment parce que les images gauches et droites ne présentent ni différence de colorimétrie ni distorsions géométriques. Autre avantage des films d'animation, aucun système compliqué d'acquisition à deux caméras n'est nécessaire.

Ce rapide historique met en exergue la notion clef de confort de visualisation. Une maîtrise insuffisante de certaines règles de production peut entraîner des fatigues oculaires, des maux de têtes ou des nausées. En outre, nous ne percevons pas tous un contenu stéréoscopique de la même façon. Cinq pour cent de la population ne voient pas le relief lorsqu'elle est exposée à ce type de contenu et 20 pour cent de la population le voient différemment : par exemple, certaines personnes ne perçoivent pas le relief qui « sortent » de l'écran. Pour créer un contenu 3D de qualité, il est primordial de bien comprendre le fonctionnement du système visuel humain.

Lorsque le regard se fixe sur un objet, deux phénomènes se déroulent simultanément, chacun assuré par des muscles spécifiques : la mise au point (ou accommodation) et la convergence. La mise au point est une déformation du cristallin (qui joue le rôle de lentille convergente) ; les rayons lumineux sont alors focalisés sur la rétine, de sorte que l'image est nette. La convergence est un mouvement latéral des globes oculaires : ils se tournent vers l'objet, afin que leurs axes optiques se croisent à son niveau.

La lumière issue de l'objet est ensuite transformée en influx nerveux, qui sont transportés jusqu'au cortex visuel, dans la partie postérieure du cerveau. Les influx y sont analysés avec d'autres informations, telle l'intensité des contractions des muscles oculaires assurant la convergence et la mise au point, ce qui crée une représentation de l'espace environnant en couleur et en volume.

Avec l'accommodation, la convergence est un indice majeur, qualifié de binoculaire, qui permet au cerveau de percevoir le relief. D'autres indices, dits monoculaires, sont

également importants : les lignes de fuite, les occlusions (un objet partiellement occulté par un autre se situe derrière lui), les tailles relatives (plus un objet semble petit, plus il est éloigné), les textures (plus leurs détails sont visibles, plus ils sont proches)... À cette liste d'indices statiques s'ajoute un indice dynamique nommé parallaxe de mouvement et qu'on observe par exemple à travers la fenêtre d'un train : le mouvement apparent d'un objet éloigné de la fenêtre est plus lent que celui d'un objet proche. Grâce à ces indices mon-

voir l'environnement en profondeur même lorsque l'un des deux yeux est déficient.

Des indices qui doivent être cohérents

L'appropriation des indices de profondeur monoculaires par les artistes a été progressive. Les peintres de la Renaissance ont été les premiers à maîtriser les lignes de fuite. Après l'invention de la photographie, on a ajouté un indice de profondeur artificiel : le flou artistique. En rendant flou l'arrière-plan ou l'avant-plan tout en laissant net le personnage principal, on guide l'attention du spectateur vers ce dernier et on accentue les différences de distance perçues entre les plans de l'image, ce qui augmente l'impression de profondeur. Tous ces indices ont été repris par le cinéma.

Pour restituer le relief sur un écran, il ne suffit donc pas de présenter une image différente à chacun des yeux : on doit aussi s'assurer que les indices de profondeur monoculaire et binoculaire concordent. C'est toujours le cas dans le monde réel, mais pas en stéréoscopie : si un objet jaillit de l'écran, par exemple, mais qu'il est masqué par le bord de cet écran (de sorte que l'indice monoculaire d'occlusion indique qu'il est derrière l'écran), cela crée un conflit psychovisuel gênant. Vérifier l'harmonie des différents indices est un travail important, qui doit être effectué avant la phase de tournage.

Enfin, maintenant dans cette dernière phase. De même que les yeux reçoivent deux images différentes, on enregistre deux vues d'une même scène sous des angles légèrement distincts, à l'aide de deux caméras montées sur un même bâti (ou on crée ces deux vues dans le cas d'un film d'animation). Elles sont écartées horizontalement l'une de l'autre d'une distance dite interaxiale. Plus elle est grande, plus l'effet 3D sera important.

Le plan de convergence est un plan qui passe par l'intersection des axes optiques des deux caméras. Les objets situés devant, dans et derrière ce plan seront respectivement visualisés devant le plan de l'écran, dans le plan ou derrière.

La longueur focale F (la distance entre l'objectif et l'image d'un point situé « à l'infini », c'est-à-dire en pratique éloigné d'au moins quelques dizaines de mètres des caméras) doit être aussi identique que possible pour les deux objectifs. Les rayons lumineux issus d'un même point ne frappent pas les capteurs des deux caméras au même endroit, et la différence de position dépend de la longueur focale et de l'angle de convergence α (l'angle entre les axes optiques des caméras). Cette différence, exprimée en pixels, est égale à la distance qui sépare les images gauche et droite d'un point sur l'écran lors de la projection. Si elle est trop importante, les yeux devraient diverger pour fixer les deux ima-

ges, ce qui est impossible (pour la plupart d'entre nous!) : cet effet, dit de divergence, peut entraîner une fatigue visuelle.

La perception d'un dédoublement du fond de l'image dans les cas extrêmes.

D'ailleurs, on ajuste la longueur focale et l'angle de convergence en fonction de la taille maximale de l'écran visé. En effet, cette taille détermine la distance entre les pixels pour une image de résolution donnée (ayant par exemple 2048 pixels par ligne, un format classique), et donc le nombre de pixels d'écart autorisé entre les images droite et gauche d'un point. C'est une des différences clés avec un tournage 2D, puisqu'on doit connaître à l'avance la dimension maximale de l'écran pour lequel le contenu est prévu (écran de parc d'attraction, de cinéma, de téléviseur...) et s'adapter en conséquence.

La transformation d'un film prévu pour le cinéma en une version télévisuelle ne pose pas ce problème de divergence puisque la distance entre les pixels, et donc entre les images gauche et droite d'un point, est plus petite sur un téléviseur ; l'inconvénient est que l'effet 3D sera moins sa-

issant. L'inverse n'est pas vrai : un contenu prévu pour le téléviseur, telle la transmission 3D d'un concert en direct, n'est pas

site un traitement de postproduction important pour être projeté au cinéma.

Des problèmes de conversion se posent aussi avec les produits nomades, tels les caméscopes, les téléphones et les tablettes numériques : ces produits commencent à être équipés de doubles caméras, permettant à l'utilisateur de produire son propre contenu 3D. Or un contenu agréable à regarder sur une tablette risque d'entraîner des fatigues visuelles sur un écran de 50 pouces ! On fournit donc des outils d'aide au tournage, afin d'apprendre au public à adapter au type d'écran visé.

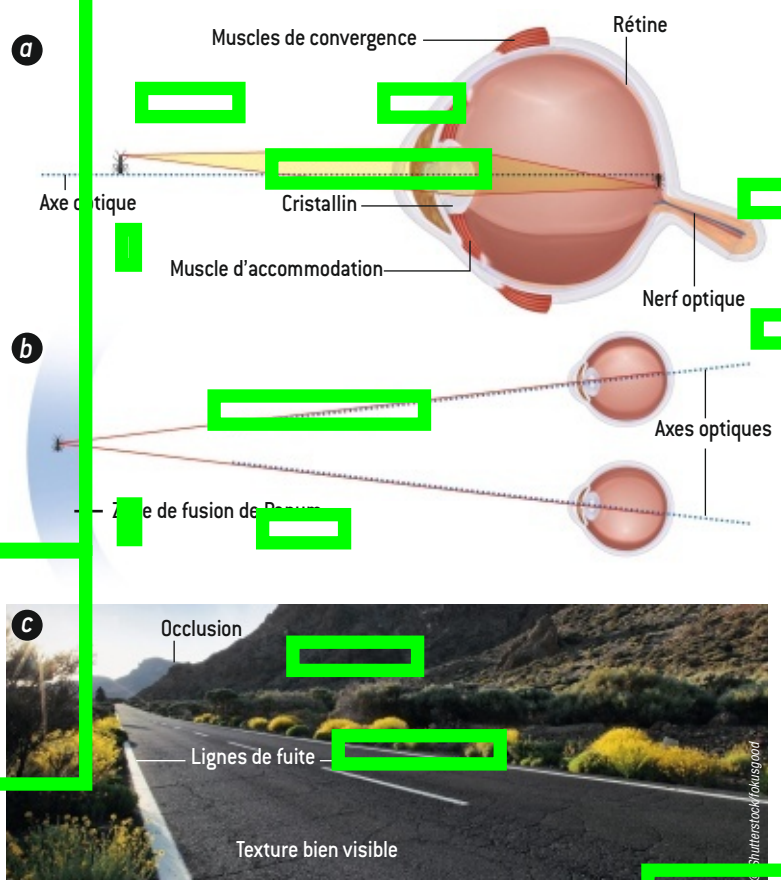
Lors du tournage et de la projection, on prête également attention aux proportions des objets. Pour un réglage de caméra donné, il existe une distance optimale à l'écran pour laquelle les volumes sont respectés : à cette distance, l'angle moyen entre les deux yeux lorsque leurs axes optiques se croisent dans le plan de l'écran est égal à l'angle de convergence des caméras. Quand le spectateur s'éloigne de l'écran, il sous-estime la taille des objets et des visages en parle d'« et Pinocchio.

VOIR EN RELIEF : LES INDICES DE PROFONDEUR

Pour élaborer une représentation en relief, le cerveau analyse le degré de recouvrement des images légèrement différentes transmises par l'œil droit et l'œil gauche. Lorsqu'on fixe un objet, les yeux effectuent des réglages nommés accommodation et convergence. L'accommodation est une déformation du cristallin (en fonction de la distance de l'objet), permettant aux rayons lumineux issus de l'objet d'être focalisés sur la rétine (a). Sans cela, l'image est floue. Lors de la convergence, les deux globes oculaires se tournent vers l'objet, afin que leurs axes optiques se croisent dans le plan de l'objet (b).

Pour estimer l'éloignement de l'objet, le cerveau utilise les différences de localisation entre les images d'un même point sur les deux rétines, ainsi que les informations issues des muscles d'accommodation et de convergence. Autour de l'objet se trouve une zone dite de fusion de Panum : pour les éléments situés dans cette zone, le cerveau fusionne les images issues des deux yeux ; en dehors, le spectacle est dit « doublet ».

Ainsi, quand on regarde au loin et qu'on rapproche un doigt de son visage, il se dédouble, car il sort de la zone de fusion de Panum. Pour apprécier la profondeur d'une scène, le cerveau se fonde aussi sur les indices dits monoculaires (c), telles les lignes de fuite, les occlusions (un élément partiellement masqué par un autre, telle la montagne du fond), les tailles relatives (les massifs de fleurs les plus éloignés apparaissent les plus petits) et les textures (plus elles sont visibles, plus l'objet est proche).



Inversement, lorsqu'il se rapproche, les formes apparaissent comprimées. On conseille alors de se placer au milieu de la salle de cinéma pour limiter les déformations.

Pour réaliser un contenu 3D de qualité, on doit donc connaître la taille de l'écran visé et la distance de visualisation moyenne, puis régler l'angle de convergence en conséquence; ensuite, il n'est plus nécessaire d'y toucher. Le seul paramètre qui doit rester réglable pendant le tournage est la distance interaxiale entre les caméras, grâce à laquelle on varie les effets de profondeur.

Malheureusement, ces règles techniques ne sont pas toujours respectées. Certains réalisateurs préfèrent par exemple adapter l'angle de convergence pour que les axes optiques des caméras se croisent au niveau du personnage, même si celui-ci se déplace vers le cameraman. Le spectateur voit donc un personnage qui grandit en taille, mais qui ne se rapproche pas, puisqu'il reste dans le plan de l'écran. Cela crée une confusion, parfois gênante, lors de l'analyse de la scène.

Plus généralement, un certain nombre de paramètres peuvent causer une fatigue visuelle, des maux de tête ou des nausées. Tout phénomène que le cerveau ne rencontre pas dans la vie courante risque de provoquer des gênes, par exemple en suscitant des conflits sensoriels (voir l'encadré page ci-contre).

Désagréments évitables

La crainte de ces désagréments freine le déploiement de la 3D. Cette crainte est parfois injustifiée, comme dans le cas du conflit entre l'accommodation (la déformation du cristallin pour que l'image soit nette) et la convergence (la rotation des yeux pour que leurs axes optiques se croisent sur l'objet): dans la vie courante, l'accommodation et la convergence ciblent le même plan, mais en stéréoscopie, nos yeux font l'accommodation dans le plan de l'écran et convergent sur les objets, qui peuvent apparaître devant ou derrière l'écran.

à cette gymnastique, on craint souvent que cela provoque une fatigue oculaire. En réalité, cette fatigue est négligeable pour un spectateur situé à plus d'un mètre de l'écran, cas du cinéma et de la télévision. En revanche, ce conflit peut être gênant sur des écrans portables, pour lesquels la distance de visualisation est de l'ordre de 10 à 40 centimètres; il faut alors limiter la profondeur des effets.

Même lorsque le risque de gêne est réel, les causes en sont assez facilement évitables ou corrigibles. Par exemple, si la scène à filmer comporte des objets brillants qui réfléchissent plus ou moins l'environnement (telle la mer, lors d'un coucher de soleil), des éclairs lumineux apparaissent parfois sur une vue, mais pas sur l'autre, ce qui peut être perturbant. On peut y remédier en partie en postproduction, mais il est préférable de surveiller ce paramètre en amont, au moment du tournage. En outre, on doit veiller au respect de la cohérence entre les images de

LE TOURNAGE : DEUX CAMÉRAS POUR SIMULER LES DEUX YEUX

Pour enregistrer les vues qui seront projetées sur les deux yeux, on utilise deux caméras, séparées d'une distance dite interaxiale (a): plus elle est grande, et plus les effets de relief perçus seront importants. L'angle α entre les axes optiques des deux caméras est nommé angle de convergence. Il doit être égal à l'angle moyen entre les deux yeux lorsqu'eux axes optiques se croisent dans le plan de l'écran.

Il doit donc connaître à l'avance la distance moyenne de visualisation prévue). Lors de la projection, les

objets apparaîtront devant, sur ou derrière l'écran selon qu'ils sont respectivement devant, dans ou derrière l'intersection des axes optiques des caméras (ici, la pomme apparaît derrière l'écran).

La distance interaxiale va de quelques millimètres pour un gros plan à plusieurs dizaines de centimètres pour des scènes lointaines. Lorsqu'elle est faible, l'encombre-

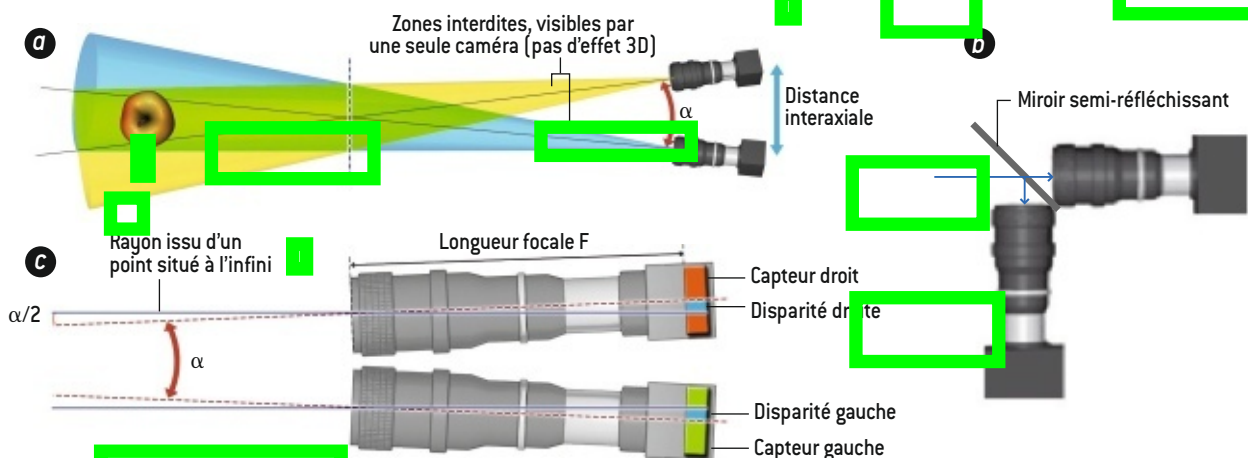
ment des caméras enregistre l'image qui traverse le miroir, tandis que l'autre caméra enregistre l'image qui est réfléchi; les deux vues distinctes sont obtenues en tournant ou en décalant les caméras. Si le miroir est déformé, un « flou diffusif » apparaît (les plans de focalisation différents et les deux images ne sont pas nettes aux mêmes endroits). Aussi produit par des différences d'ouverture et de lon-

gueur focale, le flou diffusif apparaît si l'image au même endroit sur les capteurs des deux caméras (c). La disparité droite (ou gauche) est la distance en pixels de l'image du point au centre optique sur le capteur droit (ou gauche). La disparité totale est la différence des deux; elle est égale au nombre de pixels qui séparent les images gauche et droite d'un même point sur l'écran lors de la projection. Pour

éviter la fatigue, on se sert alors d'un miroir de séparation semi-réfléchissant (b): l'une des

caméras enregistre l'image qui traverse le miroir, tandis que l'autre caméra enregistre l'image qui est réfléchi; les deux vues distinctes sont obtenues en tournant ou en décalant les caméras. Si le miroir est déformé, un « flou diffusif » apparaît (les plans de focalisation différents et les deux images ne sont pas nettes aux mêmes endroits). Aussi produit par des différences d'ouverture et de lon-

gueur focale, le flou diffusif apparaît si l'image au même endroit sur les capteurs des deux caméras (c). La disparité droite (ou gauche) est la distance en pixels de l'image du point au centre optique sur le capteur droit (ou gauche). La disparité totale est la différence des deux; elle est égale au nombre de pixels qui séparent les images gauche et droite d'un même point sur l'écran lors de la projection. Pour



Arno Bourgeois

Les gênes résultent souvent de différences entre les images gauche et droite. Les systèmes optiques des deux caméras ne peuvent être rigoureusement identiques, d'où des déformations géométriques différentes d'une vue à l'autre; le phénomène est accentué par le zoom. Des hétérogénéités de couleur et de luminosité apparaissent également entre les deux images. En outre, les deux caméras doivent être parfaitement synchronisées, car un décalage supérieur à cinq millièmes de seconde entre les prises des vues droite et gauche peut susciter des nausées pour des objets en mouvement. Enfin, les deux images sont parfois floues à des endroits différents (*voir l'encadré page suivante*). Tous ces défauts peuvent et doivent être corrigés en postproduction.

Des individus plus ou moins sensibles

Nous avons vu que chaque individu est plus ou moins sensible aux effets stéréoscopiques. Certains sont gênés, d'autres pas. Des études ont montré que c'est le cas même quand toutes les règles de production et de projection sont respectées; les gênes dont sont victimes certains spectateurs sont alors considérées comme des symptômes de dysfonctionnement de leur système visuel, la 3D agissant comme un révélateur.

Une fois les images droite et gauche enregistrées, comment les oriente-t-on vers les yeux correspondants? Trois techniques principales existent au cinéma (*voir l'encadré page suivante*). Par ordre décroissant d'utilisation, on trouve: la projection d'images polarisées combinée à des lunettes passives (systèmes *RealD* et *Technicolor*); la projection d'images non polarisées combinée à des lunettes actives (systèmes *Xtand*, *Nurvision*, *Volfo*,...); la projection d'images de spectres de couleur différents combinée à des lunettes passives (système *Dolby*).

Examinons ces techniques, qui utilisent presque toutes un projecteur numérique. Un tel projecteur se compose de lampes au xénon éclairant un ensemble de trois imageurs ou micro-écrans: chacun affiche les composantes de l'image associées à une couleur fondamentale (rouge, vert, bleu). Un système optique combine les images primaires ainsi formées et les projette via un objectif sur un écran de cinéma.

Le système *RealD*, fondé sur des images polarisées et des lunettes passives, équipe près de 80 pour cent des écrans de cinéma 3D de la planète. Les images gau-

Impact de la 3D sur l'art cinématographique

Filmer en 3D implique de respecter de nouvelles règles de prise de vue, ce qui demande au réalisateur un travail artistique différent par rapport à la 2D. Par exemple, les films d'action 3D abondent de scènes courtes et saccadées, ainsi que d'effets créés par des mouvements rapides de caméra. Ils sont à éviter en 3D. En effet, une succession de scènes courtes fait converger rapidement le regard du spectateur sur des objets situés à des profondeurs différentes, ce qui implique trop d'effets visuels. Des mouvements de caméras rapides entraînent des conflits sensoriels entre les informations transmises

au système visuel et vestibulaire – celui de l'équilibre – incluant l'oreille interne. Cela suscite des

nausées similaires à celles d'un mal de mer.

Les zooms dynamiques sont également à proscrire. L'œil n'étant pas doté de cette fonction, il n'est pas équipé pour traiter les images issues d'un zoom, et divers désagréments en résultent: aplatissement des objets, fatigue... Il est préférable de remplacer les zooms par des transitions lentes des caméras (*travellings*). Les fondus enchaînés et autres effets de transition entre plans, difficiles à maîtriser, sont aussi à limiter. Les flous artistiques, inventés pour donner du relief à l'image, sont superflus, puisque l'information réelle de pro-

fondeur est déjà présente. En outre, le spectateur balaie d'avantage l'image du regard en 3D, et si certaines parties sont

floues, cela peut créer un sentiment de gêne.

Outre ces règles techniques, des paramètres plus subjectifs sont à prendre en compte. Il faut trouver le bon équilibre entre un niveau de relief suffisant pour satisfaire le spectateur (qui peut se sentir «noyé si les effets 3D sont trop «plats») et des jaillissements trop forts ou trop fréquents, qui fatiguent la vision. Les émotions doivent être véhiculées d'une façon nouvelle, en ajoutant notamment la profondeur au mouvement, à la couleur, aux dialogues et à la musique. Dans les phases préliminaires, le réalisateur et le stéréographe écrivent le scénario.

peu comme un musicien écrit la musique d'un film en fonction des émotions à susciter...

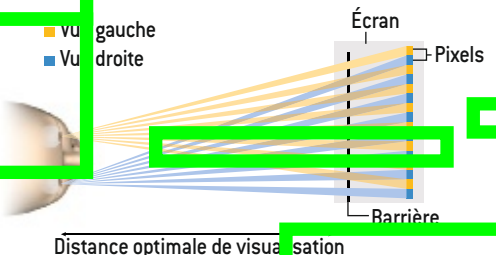
che et droite sont affichées alternativement, 48 ou 24 fois par seconde chacune selon les projecteurs. Devant l'objectif est placé un commutateur de polarisation, qui change la polarisation de la lumière en synchronisme parfait avec les images. Il comprend trois constituants: un filtre sélectionne d'abord les composantes de la lumière polarisées linéairement à 45 degrés; puis un commutateur préserve ou inverse cette polarisation; enfin, une lame quart d'onde transforme la polarisation linéaire en polarisation circulaire (gauche ou droite, selon que le champ d'entrée est polarisé à plus ou moins 45 degrés) en entraînant des retards de phase différents sur les composantes horizontale et verticale du champ.

À la sortie du commutateur de polarisation, les images gauche et droite sont respectivement dotées d'une polarisation circulaire gauche et droite. Elles sont ensuite projetées sur un écran argentique (recouvert d'une pellicule de sels d'argent), qui préserve la polarisation. Les «verres» gauche et droit des lunettes du spectateur (ils peuvent être en plastique) sont pourvus des filtres polarisants correspondants.

L'avantage principal de cette technique est le faible coût des lunettes, qu'on peut laisser au spectateur en fin de séance; il pourra les réutiliser au cinéma ou chez lui s'il dispose d'un téléviseur 3D approprié.

La 3D sans lunettes

✓ Des écrans 3D sans lunettes sont déjà utilisés pour de petits appareils, tels les téléphones portables. Un pixel sur deux affiche l'image droite (et l'autre la gauche), et une barrière, située un peu en avant du pixel, masque une des deux images à l'œil auquel elle n'est pas destinée. Les premiers téléviseurs 3D sans lunettes ont été commercialisés fin 2011 au Japon: ils sont fondés sur l'envoi directionnel de vues différentes, mais l'affichage est réalisé par des réseaux de micro-lentilles.

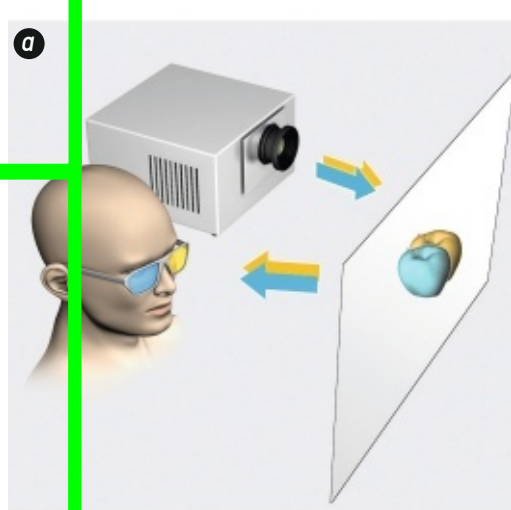


Lors de la projection, les vues droite et gauche doivent être orientées sur les yeux correspondants. Elles sont projetées alternativement au même endroit sur l'écran, et l'aiguillage se fait grâce à des lunettes (a). Aujourd'hui, trois types de lunettes existent (a, en bas) : de gauche à droite, les lunettes sont respectivement dotées de filtres polarisés (les vues droites et gauches doivent alors avoir la polarisation correspondante), d'obturateurs (lorsqu'une vue est projetée, le verre de l'œil auquel elle est destinée est opaque) ou de filtres colorés (les images droite et gauche sont alors codées avec des longueurs d'onde différentes).

Un point donné apparaît au croisement des rayons lumineux qui vont de ses images droite et gauche aux yeux correspondants (b). Selon qu'ils se croisent devant ou derrière l'écran, le point apparaît aux positions correspondantes par rapport à ce plan. Plus les images droite et gauche du point sont

éloignées, plus l'effet de profondeur est important. Lorsque les rayons sont parallèles, le point apparaît à l'infini (cas 4). Les yeux droit et gauche se tournant respectivement vers les images droite et gauche du point, celles-ci ne doivent pas être trop éloignées. Elles devraient vraiment converger (cas 5). L'écart maximal correspond à la distance interoculaire moyenne d'un adulte, de l'ordre de 65 millimètres.

Il existe une distance de visualisation optimale à laquelle les objets sont perçus aux bonnes proportions. En deçà, ils semblent comprimés et au-delà, ils paraissent allongés : ainsi, plus on s'éloigne plus la distance AB paraît longue (c). On parle d'effet Pinocchio. Le paramètre clé est le rapport entre la distance à l'écran et la largeur de celui-ci (égal au rapport entre la longueur focale et la largeur de l'objectif). Dans le cas du cinéma, où l'écran est large, ce rapport change peu, d'où l'effet Pinocchio est faible pour un déplacement de quelques rangées dans la salle.



L'inconvénient principal est l'obligation pour le propriétaire de la salle de remplacer son écran blanc standard par un écran argentique. Outre son coût élevé, ce type d'écran n'affiche pas la même luminosité selon le point de l'écran (les rebords sont plus sombres que le centre) et l'endroit de la salle d'où il est vu.

Les images peuvent aussi être polarisées par une technique alternative, développée par l'entreprise Technicolor. Cette technique fondée sur un projecteur classique, épargne l'achat d'un projecteur numérique. Sur la pellicule, les images gauche et droite sont juxtaposées verticalement sur l'espace usuellement réservé à une seule image ; elles sont comprimées pour tenir dans l'espace disponible. On remplace alors l'objectif de projection classique par un double objectif, incorporant des éléments qui dotent les images gauche et droite de polarisations circulaires différentes ; elles sont ensuite projetées au même endroit sur l'écran.

Le deuxième procédé très utilisé, notamment en France, exploite des lunettes actives : chaque verre de lunettes est constitué d'un écran à cristaux liquides, qui peut être rendu opaque ou transparent sur commande. Les images droite et gauche sont envoyées alternativement sur l'écran, mais elles ne sont pas polarisées. Pour que chaque œil voit la bonne image, un émetteur infrarouge émet des impulsions invisibles aux lunettes, afin de com-

mander l'obturation d'un des verres. Grâce à la rapidité des commutations, l'utilisateur ne perçoit pas de papillotement.

À l'inverse du précédent, ce procédé fonctionne avec un écran blanc standard. Celui-ci peut donc servir aussi bien pour des films 2D que pour des films 3D, sans que la luminosité perçue dans la salle ne soit hétérogène. En revanche, les lunettes actives présentent plusieurs inconvénients : coût élevé, nécessité de la récupérer en fin de séance et de s'assurer que les piles ou les batteries sont chargées... En outre, elles sont plus lourdes et moins confortables que les lunettes passives. C'est pourquoi certains cinémas, qui avaient d'abord opté pour les lunettes actives, y ont renoncé.

On a alors mis au point un système combinant les avantages des précédents, et évitant leurs inconvénients. Ce système, dit multiplex spectral, est fondé sur le principe de métamorphisme, selon lequel on peut créer une même couleur apparente pour l'œil humain à partir de différents spectres lumineux, autrement dit par des mélanges de couleurs différents. Ainsi, les images gauche et droite sont décomposées en composantes primaires distinctes : les images gauches, par exemple, sont toujours obtenues avec le même jeu de longueurs d'onde dont on module les amplitudes pour créer les images gauches successives. Les lunettes sont passives, composées de deux filtres colorés différents. Le verre d'un œil ne laisse alors passer que les

longueurs d'onde avec lesquelles l'image destinée à cet œil est codée.

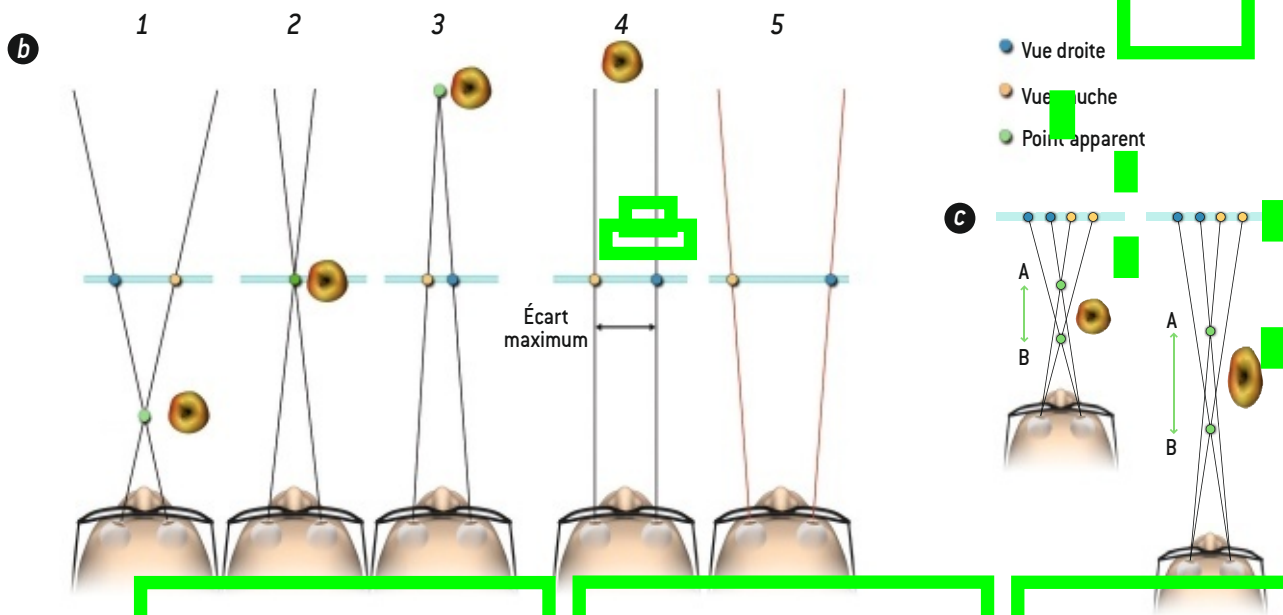
Ce système est le moins répandu, sans doute parce qu'il nécessite un changement coûteux de projecteur numérique. C'est pourtant le seul qui utilise à la fois un écran blanc et des lunettes passives. Les lunettes sont confortables et meilleur marché que des lunettes actives, mais du fait de leurs filtres colorés très sélectifs et élaborés, elles sont plus chères que celles des systèmes RealD et Technicolor.

Tous ces systèmes réduisent notablement la luminosité des images par rapport à un projecteur 2D. En moyenne, les images sont environ cinq fois moins lumineuses que des images bidimensionnelles. En outre, il arrive qu'une fraction de l'image dédiée à l'œil droit se retrouve sur l'œil gauche et réciproquement, pour diverses raisons : polariseurs imparfaits pour les lunettes passives, temps de commutation trop lent pour les lunettes actives... Un double flou automatique se superpose alors à l'image perçue ; on parle de *ghosting*.

L'arrivée de la télé 3D

Outre les cinémas, la 3D conquiert peu à peu les foyers. En 2011, 24 millions de téléviseurs 3D ont été vendus dans le monde, soit 11 % du total. Cependant, plusieurs défis restent à relever.

Aujourd'hui, la plupart des téléviseurs 3D fonctionnent avec les lunettes RealD,



dont le prix est élevé. Au coût élevé et à la difficulté de gestion des batteries s'ajoute un effet désagréable de papillotement lorsqu'on regarde un programme sous éclairage artificiel, car les images gauche et droite sont projetées à une fréquence voisine de celle de l'éclairage (50 ou 60 hertz).

Les téléviseurs à lunettes actives disparaîtront probablement d'ici 2015. Ceux à lunettes passives polarisées commencent à s'imposer, notamment aux États-Unis. Ces lunettes sont bon marché et identiques à celles de type *RealD* au cinéma ; elles fonctionnent bien quel que soit le niveau d'éclairage. Cependant, elles ont deux inconvénients principaux. Premièrement, la résolution verticale est divisée par deux (les lignes de pixels impaires et paires du téléviseur affichent respectivement les images polarisées gauche et droite). Deuxièmement, le spectateur doit être parfaitement face à l'écran, sous peine de voir des images dédoublées.

Un nouvel écran, fonctionnant avec des lunettes passives polarisées, est en cours de développement. Les images seront affichées alternativement à haute fréquence (de 240 à 360 hertz), et un dispositif commutera leur polarisation. La résolution de l'image ne sera pas divisée. Aucun effet de papillotement ou de « ghosting » n'apparaîtra. Cet écran devrait être commercialisé en 2012 ou 2013, mais il est difficile à produire en série. La sortie commerciale a déjà été repoussée à plusieurs reprises.

Autre frein : trop peu de contenu est disponible. On ne trouve qu'une centaine de films en *Blu-ray* 3D, le format 3D le plus répandu. Quelques chaînes et opérateurs de télévision proposent aussi en 3D des films et des retransmissions sportives en 3D, mais cela reste limité.

À quand la 3D sans lunettes ?

Même si les lunettes futures des téléviseurs 3D seront moins chères, il reste à prouver que le public est prêt à les acheter et à les porter régulièrement. La 3D prendra un nouveau élan le jour où une technologie sans lunettes performante sera accessible au grand public pour toute taille d'écran (de 3 à 60 pouces). De tels systèmes existent déjà sur les petits écrans des téléphones portables, les tablettes et des caméscopes 3D. Ces derniers utilisent principalement des techniques dites à barrières de parallaxe : un pixel sur deux contient l'information destinée à l'œil droit (ou gauche), et les rayons lumineux issus de ce pixel sont masqués à l'œil auquel ils ne sont pas destinés, grâce à des panneaux placés un peu en avant du pixel (voir la figure page 61, en bas).

Des téléviseurs de 12 et 20 pouces ne nécessitant pas de lunettes ont été lancés au Japon en décembre 2011 : ils diffusent neuf vues différentes de façon directionnelle, grâce à des réseaux de microlentilles placés devant les pixels ; en théorie,

neuf caméras sont donc nécessaires, mais des techniques de traitement numérique devraient permettre à terme de créer des vues intermédiaires à partir de deux vues originales stéréoscopiques. Lorsque le spectateur se trouve au bon endroit, chaque œil reçoit deux vues différentes sans l'aide de lunettes. En outre, on peut tourner autour des objets comme dans la vie réelle, même si l'angle de visualisation reste un angle limité (10 à 15 degrés). En dehors de cette zone autorisée, les yeux reçoivent des informations incohérentes et l'effet 3D n'est plus perceptible.

Pour assurer le déploiement de cette approche, on devra augmenter la taille de la zone de visualisation, en multipliant le nombre de vues. Il faudra, d'une part, fabriquer des écrans plats avec une résolution très supérieure à ce qui existe aujourd'hui (de l'ordre de 4 à 16 fois la résolution HD), et, d'autre part, atteindre des prix compatibles avec le marché de masse des téléviseurs. Selon les estimations, on y parviendra en cinq à dix ans.

Au cinéma, la 3D sans lunettes nécessitera d'augmenter le nombre de projecteurs et de remplacer l'écran classique par un écran illuminant les différentes vues dans des directions distinctes. Cela représente des investissements coûteux, voire rédhibitoires. Même si des prototypes de petite taille ont été réalisés en laboratoire, la 3D sans lunettes sera encore longue à mettre en place au cinéma...

Le DÉPISTAGE du cancer de la prostate

Marc Garnick

Faut-il dépister systématiquement le cancer de la prostate chez l'homme âgé de plus de 50 ans ? Aujourd'hui, beaucoup de médecins pensent que non, parce que les risques semblent l'emporter sur les bénéfices pour certains malades.

À l'automne 2011, un comité consultatif américain composé de médecins et d'épidémiologistes a fait sensation en déclarant que les hommes en bonne santé ne doivent plus faire de façon systématique le test sanguin de dépistage du cancer de la prostate. Le comité a déclaré que l'analyse des données disponibles n'avait mis en évidence qu'un bénéfice faible, si ce n'est nul à long terme, du dosage de l'antigène spécifique de la prostate, PSA, chez la majorité des hommes ne présentant aucun symptôme de la maladie. Non seulement le dépistage systématique coûte plus de vies, mais il expose inutilement de nombreux

hommes, pour lesquels le test de dépistage était positif, aux complications liées à l'intervention chirurgicale ou au traitement : l'impuissance et l'incontinence urinaires dues à l'ablation chirurgicale de la prostate, ou des saignements rectaux après une radiothérapie. Le comité américain estime qu'aux États-Unis plus d'un million d'hommes avaient été traités depuis 1985 après un test de dépistage positif. Au moins 5 000 d'entre eux sont décédés peu de temps après le traitement et 300 000 ont souffert d'impuissance ou d'incontinence ou des deux à la fois. L'annonce du comité consultatif, dont la volonté est d'éviter ces effets secondaires au maximum

de patients, suscite rapidement un contre-feu de la part de plusieurs organisations professionnelles, notamment de l'Association américaine d'urologie.

La controverse n'est pas récente. Des experts débattent depuis longtemps de l'intérêt du dosage du PSA, mais jusqu'ici, aux États-Unis, la majorité se déclarait en faveur du maintien du test. En tant qu'oncologue spécialiste du cancer de la prostate, j'adhère à la prise de position récente du comité consultatif. S'il faut insister sur le fait que le dosage de l'antigène PSA fournit de précieuses informations chez un homme qui a un cancer de la prostate, il faut aussi reconnaître que les preuves en faveur du dosage systématique du PSA sont fragiles. Soulignons qu'en France également, la Haute autorité de santé a récemment émis un avis identique à celui du comité américain.

Le débat ne porte pas uniquement sur le dosage du PSA. Se pose la question de savoir s'il faut traiter un patient dont le

en question

L'ESSENTIEL

- ✓ Des études ont montré que des tests sanguins de dépistage du cancer de la prostate ne réduisent pas la mortalité.
- ✓ De trop nombreux hommes ont probablement souffert des effets secondaires de traitements qui n'étaient pas nécessaires.
- ✓ Malgré ces résultats, certains médecins continuent à penser que le dosage systématique de l'antigène prostatique reste nécessaire.
- ✓ Certains cancers évoluent très lentement, si bien que le dépistage associé à un traitement différé semble être un bon compromis.

Par M. Pour Photo Research Inc.

test de dépistage est positif, et à quel moment il convient de le faire. Même après les traitements les plus avancés, les complications sont fréquentes. Et là aussi, les choix thérapeutiques évoluent : on abandonne de plus en plus les traitements agressifs identiques pour tous pour privilégier des approches plus prudentes et individualisées. La plupart des médecins – et j'en fais partie – ont pris conscience que le cancer de la prostate peut évoluer différemment d'un patient à un autre et que le traitement prématuré n'est pas la panacée en laquelle nous avons voulu croire.

Ces controverses sont nées du fait que le dosage du PSA et les traitements présentent des inconvénients. Dans un monde parfait, un tel test identifierait seulement les cancers mortels en l'absence de traitement. Les hommes présentant des cancers curables seraient traités et ne mourraient pas de leur cancer. Idéalement, les traitements seraient non seulement efficaces, mais aussi sans effets secondaires

graves. Un tel scénario justifierait un dépistage systématique de toute la population masculine et le traitement de toute personne dont le test serait positif.

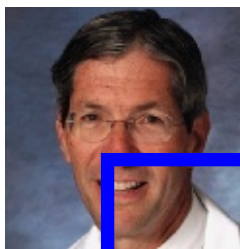
La réalité est cependant très différente. Le test ne révèle pas qu'un homme a un cancer, mais seulement qu'il a peut-être un cancer. Le test mesure la concentration sanguine de l'antigène spécifique de la prostate, protéine produite par les cellules de la prostate et dont la valeur peut varier pour différentes raisons, notamment la prolifération bénigne de la taille de la glande avec l'âge, l'activité sexuelle ou la prolifération de cellules malignes. Si le test est positif, on pratique une biopsie, c'est-à-dire un prélèvement du tissu prostatique, ce qui est douloureux et présente un certain risque. Cette biopsie permet de confirmer ou d'infirmer la présence d'un cancer. Malheureusement, les médecins n'ont pas de moyens fiables de déterminer lesquels de ces petits cancers détectés par une biopsie présentent

un danger potentiel et lesquels ne seront jamais une menace pour la longévité de l'individu. En fait, des études montrent que plus de la moitié des quinquagénaires et les trois quarts des octogénaires aux États-Unis ont un cancer de la prostate ; mais la plupart d'entre eux mourront de toute autre chose. Ainsi, les médecins ne savent pas dans lesquels de leurs patients doivent absolument être traités et ceux pour qui un traitement est inutile.

Cette ambiguïté ne serait pas grave si les traitements étaient sans risque. Les moyens consacrés à traiter tout le monde se justifient en fait, mais ils traitent les malades qui en avaient réellement

CERTAINES CELLULES CANCÉREUSES de la prostate (ici en microscopie électronique à balayage et colorisées), découvertes chez un homme qui ne présente pas de symptômes, ont parfois une évolution lente. Elles ne représentent pas toujours une menace pour l'organisme et ne nécessitent pas forcément un traitement.

L'AUTEUR



Marc GARNICK est médecin et chercheur spécialiste du cancer de la prostate, à la Faculté de médecine de Harvard et au Centre médical Beth Israel Deaconess à Boston.

Au-delà du dosage du PSA

✓ Avec la remise en question du dosage du PSA, les oncologues cherchent de nouveaux biomarqueurs pour le remplacer. L'antigène spécifique de la prostate peut être évalué par des méthodes plus précises, en particulier la mesure du rapport du PSA libre dans le sang et du PSA total. Dans la nouvelle génération de biomarqueurs, citons PCA3 et TMPRSS2-ERG. PCA3 est un brin d'ARN messager non codant dont la concentration est élevée dans les cellules de la prostate tumorales, mais que l'on peut doser dans les urines. Quant au gène TMPRSS2-ERG, il a tendance à fusionner avec lui-même, fusions spécifiques du cancer de la prostate. La combinaison de ces deux biomarqueurs donne de meilleurs résultats que le dosage du PSA. D'autres biomarqueurs sont actuellement à l'étude.

besoin. Mais les traitements sont loin d'être anodins. La prostate étant située près du rectum, de la vessie et du pénis, son ablation chirurgicale ou son traitement par radiothérapie présentent souvent des complications à long terme.

Chaque méthode a des effets indésirables. La chirurgie (prostatectomie) entraîne souvent une incontinence urinaire, parce que l'ablation de la glande nécessite de déconnecter la partie inférieure de la vessie et le canal urinaire qui passe dans le pénis. Le chirurgien reconnecte ensuite la vessie à l'urètre, mais le muscle contigu qui contrôle la miction est parfois endommagé, ce qui aboutit à une incontinence. De même, les nerfs et les vaisseaux sanguins qui contrôlent l'érection peuvent être touchés pendant l'opération, ce qui peut aboutir à des troubles de l'érection (impuissance).

La radiothérapie entraîne souvent, outre l'impuissance, des lésions du rectum et de la vessie, car il est difficile d'éviter que les rayonnements ne touchent aussi ces organes. En outre, des pertes de sang et de matières fécales par le rectum sont des effets indésirables fréquents, mais que les patients ne signalent pas toujours, qu'ils aient été traités par radiothérapie (y compris par implantation de particules radioactives directement dans la prostate) ou par chirurgie.

Et c'est sans parler des effets indésirables dus aux traitements – traitements hormonaux, immunothérapies ou chimiothérapie – utilisés dans le cas des cancers avancés, et parmi lesquels on peut citer la perte du désir sexuel, l'impuissance, une prise de poids, une perte de la masse osseuse, des bouffées de chaleur et des troubles cardiaques et hépatiques. On comprend qu'alors que le médecin propose un traitement à son patient, tous les risques doivent être minutieusement analysés à l'aune des bénéfices escomptés.

Les données remettant en cause les bénéfices du dosage du PSA se sont multipliées depuis quelques années. En 2008, lors de la dernière révision des directives relatives au dosage du PSA, le comité consultatif a recommandé que les médecins ne réalisent plus le test sur les hommes âgés de plus de 75 ans et ne présentant aucun symptôme. Les données ont montré qu'à cet âge la plupart des hommes atteints d'un cancer de la prostate ont une forte probabilité de décéder d'autre chose. Un an plus tard, deux importan-

tes études prospectives ont été publiées, et elles semblaient régler la question pour les hommes plus jeunes également.

Dénotées respectivement étude européenne et étude américaine, les deux rapports concernaient des hommes, en bonne santé, âgés de 50 à 70 ans, répartis de façon aléatoire en deux groupes. Les hommes de l'un des groupes ont été soumis périodiquement à un dépistage du cancer de la prostate, soit par dosage du PSA, soit par toucher rectal (le médecin peut repérer des anomalies de la prostate en insérant un doigt dans le rectum du patient), soit par les deux à la fois. En cas de résultat anormal de l'un des deux examens, un biopsie était réalisée et si cette dernière indiquait un cancer, un traitement était généralement recommandé.

L'utilité du dosage du PSA contestée

Les hommes du second groupe n'ont pas bénéficié d'un dépistage systématique ; ils ont cependant reçu les soins médicaux standards en cas de besoin. Par exemple, s'ils commençaient à présenter des symptômes de cancer de la prostate, tels des troubles urinaires (qui peuvent aussi résulter d'une augmentation bénigne de la taille de la prostate), ils étaient soumis à un dosage du PSA. À la fin des périodes fixées pour les études, deux critères importants ont été évalués chez les participants : les hommes dépistés et traités ont-ils vécu plus longtemps que ceux qui n'ont pas bénéficié du test ? Quelle a été la mortalité des hommes chez qui l'on avait diagnostiqué un cancer et qui avaient été traités, par rapport aux hommes non dépistés ?

Il est d'abord apparu que les hommes dépistés et traités n'ont pas vécu plus longtemps. Toutefois, l'étude européenne a révélé, et ce fut la seule différence notable, que ceux qui avaient été dépistés et traités avaient moins (20 pour cent) de risques de décéder d'un cancer de la prostate. Mais cette baisse de la mortalité par cancer de la prostate n'a pas été observée dans l'étude américaine.

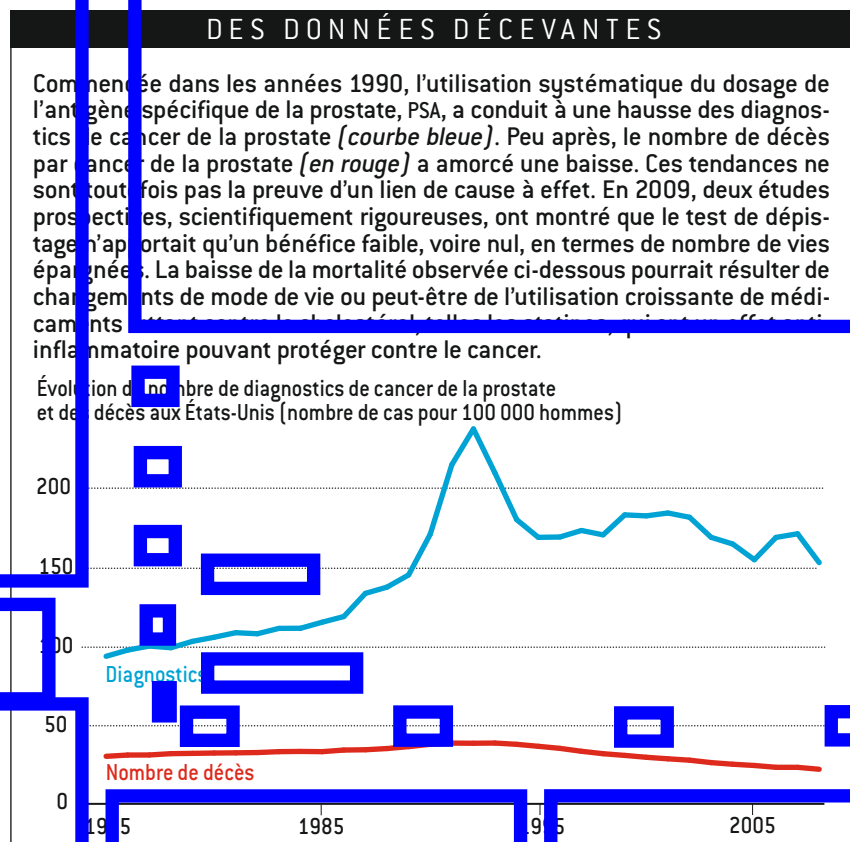
À partir de l'étude européenne, on a ensuite calculé combien d'hommes devraient être dépistés et traités pour éviter un unique décès dû au cancer de la prostate : la détermination de ce « nombre de patients à dépister » a pris une importance croissante dans les tentatives visant à trouver des tests de dépis-

tage sont les plus utiles. Les chercheurs européens ont déterminé que pour sauver une vie en cas de cancer de la prostate, environ 1 400 hommes devraient être dépistés, ce qui conduirait à traiter 48 hommes. Il y aurait donc 47 hommes qui subiraient une intervention inutile, et ses effets indésirables, pour que le décès par cancer de la prostate d'un homme soit évité. Qui plus est, malgré la possibilité d'éviter un décès par cancer de la prostate, on s'interroge sur la validité de ce dépistage puisque le taux de mortalité, toutes causes confondues, était le même dans les groupes de patients dépistés et non dépistés. De récentes analyses de sous-groupes de l'étude européenne ont suggéré que le nombre d'hommes à traiter pourrait être de 12 et non de 48. Mais ce résultat provient d'une étude spécifique que de la Suède et pourrait ne pas être applicable à plus grande échelle.

Monsieur H. refuse de se faire traiter

Comme toujours en médecine, il faut tenir compte des spécificités de chaque individu. Les données suggèrent que les hommes en bonne santé et ne présentant pas de symptômes ne doivent pas être soumis au dépistage systématique. En revanche, ceux qui ont de lourds antécédents familiaux de cancer de la prostate (les hommes dont, par exemple, le père, un oncle ou un grand-père est décédé de la maladie avant l'âge de 70 ans) peuvent raisonnablement décider de se soumettre à un dosage systématique du PSA. En tant que médecin, j'estime qu'il serait difficile de leur refuser de réaliser un dosage du PSA, surtout s'ils le demandent. Ils ont probablement hérité d'une prédisposition génétique à la maladie, qui les rend plus sensibles que le reste de la population. D'ici quelques années, nous serons certainement en mesure d'utiliser des tests génétiques spécifiques pour identifier les individus à risque, auxquels il faut porter une attention particulière.

En 1996, l'un de mes patients a anticipé, sans le savoir, la position du comité consultatif alors qu'il avait 54 ans. Contre l'avis des spécialistes du cancer qu'il avait consultés (moi y compris), il a décidé de renoncer à tout traitement, après un dosage systématique du PSA qui avait abouti à un diagnostic de cancer de la prostate. Déjà à cette époque, j'ai insisté sur les



ports disponibles l'avait conduit à la conclusion qu'il était peu probable qu'il décède de son cancer, du moins dans un avenir proche. De plus, il estimait que le fait de différer le traitement pouvait lui être bénéfique si de nouvelles thérapies plus efficaces apparaissaient dans les années à venir. Il refusait donc un traitement immédiat, tout en adoptant des habitudes plus saines et en perdant du poids. Tous les ans après cette décision audacieuse, j'ai conseillé à mon patient, que j'appellerai Monsieur H., d'accepter un traitement et chaque fois il a résolu ment refusé de suivre mon conseil.

Seize ans plus tard, Monsieur H. est toujours en vie et la tumeur reste circonscrite à la prostate. Il n'a pas subi d'intervention chirurgicale et n'a reçu ni radiothérapie ni traitement médical pour son cancer. Son taux de PSA a augmenté de 7 à 8 nanogrammes par millilitre – la valeur maximale considérée comme normale étant fixée à quatre nanogrammes par millilitre. Cette augmentation reste modérée et montre que le cancer évolue très lentement. Bien entendu, si nous avions su cela en 1996, la décision de ne pas le traiter aurait été plus facile à prendre. En nous demandant sur quelles preuves reposaient nos recommandations, il a pu prendre une

décision raisonnée, fruit d'un choix de vie. Presque certains qu'ils auraient accompagné des bénéfices incertains.

Les cancers qui n'évoluent pas

En fait, la première fois que j'ai rencontré Monsieur H., nos recommandations étaient fondées non pas sur des essais cliniques solides mais sur une idée fausse de la façon dont un cancer de la prostate évolue dans le temps. Nous savions que certaines tumeurs de la prostate se développent lentement et que d'autres sont très agressives. Nous supposions aussi que la plupart des tumeurs finissaient par évoluer, à partir de petites croissances cancéreuses, en tumeurs métastatiques, qui envahissent tout le corps et sont incurables. Neutraliser un cancer à un stade précoce et l'enlever ou le détruire signifiait donc, presque toujours, que nous avions sauvé une vie. Cette hypothèse apparemment logique nous a conduits à conseiller à nos patients de se faire traiter pour tout cancer détecté à un stade précoce et de considérer qu'ils avaient eu de la chance. En fait, tous les programmes de dépistage de cancer de la prostate reposent sur cette logique.

✓ BIBLIOGRAPHIE

J. Prensner et al., Beyond PSA: The next generation of prostate cancer biomarkers, *Sci. Transl. Med.*, vol. 4 (127), 28 mars 2012.

Haute autorité de santé, Rapport d'orientation - Cancer de la prostate : identification des facteurs de risque et pertinence d'un dépistage par dosage d'antigène prostatique de populations d'hommes à haut risque ?, 2012. <http://bit.ly/1DCKNU>

M. Garnick et A. MacBassel, 134th 2012 Annual report on prostate diseases, Harvard Health Publications, 2012.

R. Chou et al., Screening for prostate cancer: A review of the evidence for the U.S. preventive services task force, *Annals of Internal Medicine*, vol. 155, n° 11, pp. 762-771, 2011.

Malheureusement, les données collectées sur la mortalité durant les 25 dernières années montrent que l'histoire naturelle du cancer de la prostate n'est pas aussi simple que nous l'avions cru. Le fait est que le taux de mortalité par cancer de la prostate a baissé après avoir atteint sa valeur maximale dans les années 1990. Alors que les adeptes du dépistage soutiennent que cette baisse est liée au dosage systématique du PSA, leur conclusion n'est pas corroborée, comme nous l'avons vu, par les études prospectives. De surcroît, si notre compréhension de la façon dont les cancers de la prostate se développent et évoluent avait été correcte, le taux de mortalité aurait dû baisser bien plus et plus vite. En fait, nous savons maintenant que de nombreux cancers de la prostate n'évoluent pas du tout. Leur croissance est si lente qu'on peut la considérer comme nulle.

Les chercheurs découvrent de plus en plus d'exemples de cancers, qui sont diagnostiqués par des anomalies cellulaires, mais qui néanmoins évoluent si lentement

qu'ils ne s'étendent pas ou ne deviennent pas mortels. Il est question de donner à ces croissances un autre nom, par exemple tumeur « indolente », pour souligner le fait qu'elles ne nécessitent pas obligatoirement un traitement. Nous ne savons pas les reconnaître au premier coup d'œil, mais nous pourrions avoir des présomptions en fonction des caractéristiques de la tumeur. Nous pourrions confirmer notre hypothèse en effectuant un suivi des patients.

Changer des habitudes enracinées est tout aussi difficile en médecine que dans tous les domaines de la vie quotidienne. Il y a sûrement un grand nombre d'hommes (sans compter leurs médecins) qui ne se sentent pas rassurés de renoncer au dosage systématique du PSA, après l'avoir pratiqué pendant plusieurs années. Certaines personnes jureront que le dosage du PSA leur a sauvé la vie. Heureusement, je pense que nous pourrions leur faire comprendre que l'on peut être pris en charge

correctement tout en évitant de nombreux traitements inutiles. Il s'agira de sortir du dilemme « traiter ou ne pas traiter » en

universcience présente

les conférences

à la Cité des sciences et de l'industrie

Curiosity sur Mars

Repardons à la découverte de la fascinante planète Mars. À partir des premières images captées par le rover *Curiosity*, quelques spécialistes détailleront les particularités de la mission : le plus gros rover jamais envoyé sur Mars, un mode d'atterrissage inédit, une caméra panoramique, un cratère témoin de la présence d'eau liquide sur la planète...

> Réservation conseillée sur conferences@universcience.fr

entrée libre

[SAMEDI 11 AOÛT À 15H]
→ Auditorium

Avec le soutien de

SCIENCE CIEL ESPACE

programme complet sur www.universcience.fr

Diagnostic précoce et éducation thérapeutique

Dans son article, Marc Garnick relate la controverse qui sévit aux États-Unis sur le dépistage du cancer de la prostate, et fait écho à ce qui se passe en France, où il existe pourtant une culture du dépistage de masse (ou organisé). En effet, un dépistage organisé a cours depuis 2000 pour le cancer du sein (premier cancer chez la femme) et depuis 2008 pour le cancer du côlon-rectum (premier cancer dans les deux sexes). Ces dépistages ont été mis en œuvre parce que plusieurs études avaient montré une diminution significative de la mortalité pour les cancers en cause chez les personnes soumises au dépistage, par rapport à celles qui ne l'étaient pas.

Pour que cela n'est-il pas le cas pour le cancer de la prostate, cancer le plus fréquent chez l'homme (71 000 nouveaux cas estimés pour 2011) et qui représente la troisième cause de mortalité par cancer (8 700 décès estimés pour 2011) alors qu'une étude européenne a montré une réduction significative de la mortalité pour le cancer de la prostate chez les hommes âgés de 55 à 69 ans soumis au dépistage par rapport à ceux qui ne l'étaient pas ?

En France, la Haute autorité de santé, HAS, n'a pas recommandé la mise en place d'un programme de dépistage organisé. En revanche, et même s'il n'est pas évalué, un dépistage individuel a cours qui s'apparente à une démarche de diagnostic précoce, au cas par cas, décidée le plus souvent par le médecin généraliste, en consultation avec l'homme qui consulte pour avis ou qui présente des symptômes urinaires : cette démarche repose sur

le toucher rectal. Ce geste qui doit être expliqué et réalisé avec tact ne perçoit que la prostate périphérique, mais c'est là où siège la majorité des cancers. Il doit s'accompagner d'un dosage sanguin de l'antigène spécifique de la prostate, PSA.

La fréquence de cette démarche est mal connue. Toutefois, une étude de la Caisse primaire d'assurance-maladie de travailleurs spécialisés, CNAMTS, sur la pratique du dosage du PSA en France a montré que, pour l'année 2010, 13 pour cent des hommes âgés de 40 à 54 ans, 47,7 pour cent des 55 à 74 ans et 47,6 pour cent des 75 ans et plus avaient eu un dosage du PSA. Dans un tel contexte, le risque est de surdiagnostic, exposant au surtraitement par chirurgie ou radiothérapie, traitements non dénués de risques potentiels, alors qu'il peut s'agir de cancers indolents, d'évolution lente. Il est surtout important de dépister les cancers qui risquent d'évoluer rapidement.

Des recherches sont en cours pour évaluer la démarche diagnostique et redéfinir la pratique des biopsies en évaluant l'apport de l'imagerie par résonance magnétique ou le dosage du PCA3, qui est un ARN messager spécifique des cellules cancéreuses où il est surexprimé.

En pratique, l'anxiété suscitée par le risque de cancer de la prostate et par sa fréquence et son impact sur la qualité de vie et

75 ans, dans le cadre d'un consentement éclairé, le médecin devant prendre le temps nécessaire pour expliquer les objectifs et le parcours de soins, sans de doute lors d'un toucher rectal et/ou d'une valeur anormale du PSA, doit être discuté avec la personne pour qu'elle donne ou non son accord sur la procédure proposée.

Parcours de soins

La Haute autorité de santé a établi des recommandations avec l'Institut national du cancer et l'Association française d'urologie concernant l'information à apporter aux hommes désireux de se soumettre à un dépistage individuel. Selon l'Association française d'urologie, « le dépistage pour le cancer de la prostate doit être recommandé dès 55 ans chez les hommes à haut risque de développer un cancer de la prostate (origine afro-antillaise ou antécédents familiaux (au moins deux cas collatéraux ou de survenue avant 55 ans)). Le dépistage n'est pas recommandé chez les hommes dont l'espérance de vie est estimée inférieure à dix ans en raison d'un âge avancé ou de comorbidités sévères ».

En cas de suspicion de cancer, l'urologue sollicite pour avis le médecin traitant, compte de l'âge, des antécédents familiaux et personnels, des symptômes, du volume de la prostate estimé au toucher rectal ou, mieux, par ultrasons, pour juger de l'opportunité de la biopsie dont il expliquera les bénéfices et les risques, ainsi que la conduite à tenir en cas de résultats positifs. La démarche envisagée pour le cancer de la prostate, conduite dans une perspective d'éducation thérapeutique, place la personne dans un partenariat de soins. Si le dépistage est négatif, la procédure recommencera l'année suivante ou plus tard, selon le contexte médical et la valeur du PSA.

Si les biopsies sont positives, une consultation aura lieu avec l'urologue qui annonce le résultat au malade (et à son entourage si besoin).

L'urologue explique au patient la nature du cancer, le nombre de biopsies positives, l'architecture tumo-

rale (score de Gleason) et la valeur du PSA. Conformément aux recommandations du Plan cancer, l'observation du patient est présentée lors d'une réunion de concertation pluridisciplinaire comportant un urologue, un oncologue médical, un oncologue radiothérapeute et un oncologue médical. À l'issue de cette réunion, ces spécialistes proposent un programme personnalisé de soins prenant en compte son âge, la présence éventuelle de maladies associées, le stade du cancer et sa potentialité évolutive, la qualité de vie et les souhaits du patient.

Le choix thérapeutique inclut la surveillance active fondée sur des critères précis pour les cancers à un stade précoce, ce qui laisse au patient indéfini le temps de choisir. La prostatectomie radicale avec lymphadénectomie (ou ablation des ganglions lymphatiques situés à proximité) et la radiothérapie conformationnelle avec modulation d'intensité représentent les traitements standards pour les cancers localisés ou localement avancés ; la curiethérapie par implants permanents de grains d'iode 125 est une alternative pour les cancers localisés de bon pronostic. Parfois, il sera nécessaire d'associer la chirurgie et la radiothérapie, ou d'ajouter un traitement médical adjuvant, comme l'hormonothérapie, et le patient sera suivi de près.

Ces traitements devront se faire dans des centres de soins accrédités par les Agences régionales de santé. Cette approche en faveur d'un diagnostic précoce est plus nuancée que celle préconisée par M. Garnick. Nous ne proposons pas un dosage systématique du PSA à la personne qui consulte, mais nous décidons avec elle, selon son âge, son état de santé, ses antécédents familiaux, de la conduite à tenir ; en cas de cancer de la prostate avéré, le parcours de soins sera défini de façon pluridisciplinaire et proposé au patient afin qu'il se sente rassuré et correctement pris en charge.

M. Garnick, urologue, Centre de cancérologie, Clinique universitaire de cancérologie-radiothérapie, CHU Albert Michallon, Grenoble

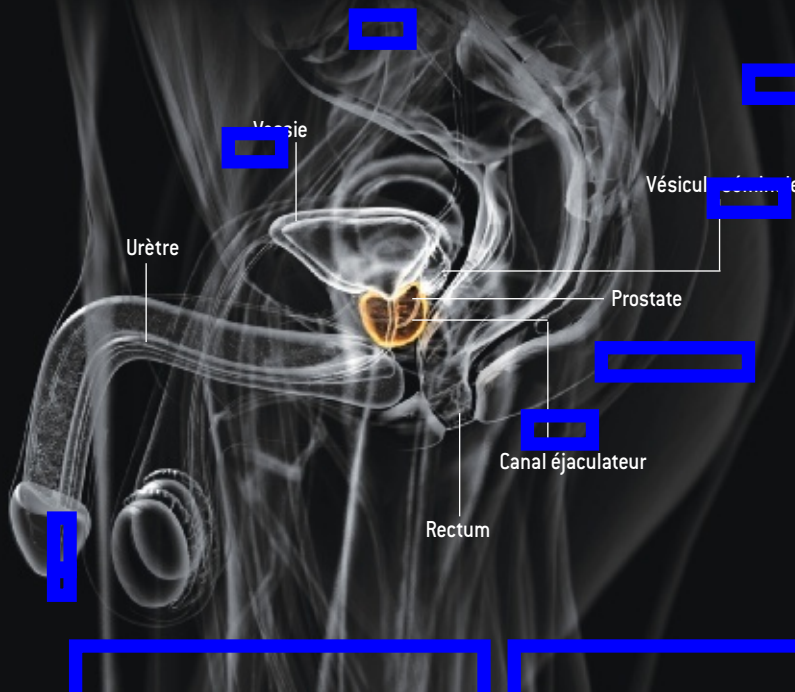


Pour que la personne qui consulte puisse donner son accord éclairé sur un éventuel dépistage du cancer de la prostate (ou le refuser), le médecin doit lui en expliquer les avantages et les risques.

M. Garnick, urologue, Centre de cancérologie, Clinique universitaire de cancérologie-radiothérapie, CHU Albert Michallon, Grenoble

LES RISQUES DE COMPLICATIONS

Le traitement du cancer de la prostate consiste à éliminer chirurgicalement la prostate ou à la détruire par radiothérapie. Toutefois, étant donné la localisation de cette glande nécessaire à la production du liquide séminal, les deux méthodes risquent de lésier des tissus sains à proximité. La prostate est située sous la vessie, devant le rectum et près des nerfs qui interviennent dans l'érection, de sorte que la radiothérapie et l'ablation chirurgicale peuvent toucher ces organes et entraîner incontinence, impuissance et saignements rectaux.



Bryan Christie

adoptant une stratégie consistant à différer tout traitement pour les cancers indolents ou progressant très lentement, mais à traiter tout cancer potentiellement fatal.

Ne plus intervenir sur tous les cancers

Une proportion importante des hommes que je suis pour un cancer de la prostate ne reçoivent aucun traitement pour le moment. Ils participent en revanche à un programme dit d'« attente vigilante » ou de « surveillance active avec traitement différé ». En d'autres termes, ces hommes ont choisi de réaliser le dosage du PSA, ont appris qu'ils ont une tumeur, mais ont décidé de ne pas se faire traiter immédiatement. Ils font contrôler très régulièrement leur concentration de PSA et font réaliser des biopsies périodiques de la prostate, pour surveiller l'activité de leur tumeur. En 2011, un groupe d'experts piloté par les Instituts américains de

la santé a déclaré que la surveillance active était une option viable qui devrait être proposée aux patients présentant un cancer de la prostate peu évolutif.

Le traitement est envisagé si des biopsies ultérieures montrent que la croissance s'est accélérée, que la concentration de PSA augmente rapidement ou que les cellules de la nouvelle biopsie paraissent plus dangereuses au microscope (d'après le score de Gleason, avec une valeur égale à deux pour un pronostic favorable et à dix pour un risque élevé). Les résultats d'une étude de longue durée menée au Canada indiquent que le taux de mortalité par cancer de la prostate chez les personnes ayant choisi la surveillance active est d'environ un pour cent sur dix ans, chiffre à comparer au 15 pour cent de risque de décès des suites d'une complication survenant dans les mois qui suivent une opération chirurgicale du cancer de la prostate...

De surcroît, la décision initiale de renoncer au traitement n'est pas nécessairement

définitive. La chirurgie, la radiothérapie et d'autres traitements sont toujours disponibles ultérieurement et les données indiquent que leur report n'aura pas d'effet négatif sur l'évolution de la maladie. Pour ceux qui ont finalement besoin d'un traitement, des techniques plus récentes, qui détruisent uniquement la partie cancéreuse de la glande (thérapie focale du cancer de la prostate), peuvent être appropriées et entraînent moins d'effets indésirables, bien que des études comparatives rigoureuses ne soient pas encore terminées.

Pour les quatre pour cent d'hommes atteints d'un cancer de la prostate, qui s'est étendu au moins à un autre organe, on ne sait pas encore les guérir. Mais les traitements disponibles sont progressivement améliorés. Les soins usuels pour les hommes ayant un cancer à un stade avancé s'appuient sur des médicaments qui bloquent la testostérone et empêchent le cancer de se développer. Malheureusement, quelques cellules tumorales peuvent résister aux effets de cette castration chimique et continuer à provoquer des dégâts. Récemment, l'Agence américaine pour les aliments et les médicaments, la FDA, a approuvé deux nouvelles méthodes de traitement de la maladie à un stade avancé.

La première consiste à renforcer la capacité du système immunitaire à détruire les cellules malignes. La seconde fait appel à un médicament nommé abiraterone, un inhibiteur sélectif de la synthèse de la testostérone dans les cellules cancéreuses. Des études portant sur les deux traitements montrent qu'ils allongent la survie en moyenne de quatre mois. D'autres traitements, qui bloquent des molécules spécifiques dont les cellules cancéreuses ont besoin pour se développer et se propager, sont en cours d'étude.

Nous avons beaucoup appris sur le cancer de la prostate depuis que Monsieur H. a choisi de ne pas traiter ce qui s'est révélé être une tumeur à croissance très lente. Grâce à ces connaissances, nous proposons des traitements mieux adaptés à chaque individu, au lieu de traiter tout le monde de la même façon. Nous, médecins, devons être très honnêtes envers nous-mêmes et envers nos patients pour reconnaître ce que nous savons et ce que nous ignorons, et pour avoir le courage d'agir en fonction des preuves scientifiques et non pas seulement d'après nos convictions.



SCIENCES SUR SEINE

2012

DU 31 MAI AU 3 JUIN
13^e Salon des Jeux
mathématiques :
« Maths en Scènes »

Quatre jours d'intenses
activités ludiques !

Comité international
des Jeux mathématiques
Place Jussieu et Campus
de l'université Pierre
et Marie Curie, 5^e arr.
www.cijm.org

31 MAI ET 14 JUIN
À 18H30
Santé en questions

Conférences citoyennes

Inserm / Universcience
Palais de la Découverte,
8^e arr.
http://dircom.inserm.fr/sante_en_questions

TOUS LES WEEK-ENDS
DU MOIS DE JUIN
Promenades
scientifiques

Une façon insolite
de découvrir Paris !

Association française
d'Astronomie / Société
géologique de France /
Parcours des Sciences
Dans différents
arrondissements de Paris
www.paris.fr

9 JUIN DE 20H30 À MINUIT
Nuit du Film scientifique

Projection en plein air

Association Science
et Télévision
Parvis de l'Hôtel de Ville, 4^e arr.
www.science-television.com



DU 23 AU 26 JUIN
Festival des deux infinis :
rayons cosmiques

Observations astronomiques,
conférences, visites
de laboratoires...

Association française
d'Astronomie
Parc Montsouris
et nombreux autres lieux
dans Paris - www.afanet.fr

...
et bien d'autres
manifestations gratuites
à venir !

Les FOURMIS

Mark Moffett

Les batailles entre fourmis présentent d'étonnantes similitudes avec certaines opérations militaires humaines. En fonction des enjeux, ces insectes adaptent leur stratégie à l'ennemi.

La bataille fait rage. Des dizaines de milliers de fourmis balayent tout sur leur passage. Elles ne battent jamais en retraite. Les engagements sont brefs et brutaux : trois fantassins saisissent un ennemi et l'immobilisent, jusqu'à ce que l'un des guerriers, plus grand, s'avance et coupe en deux le corps du captif.

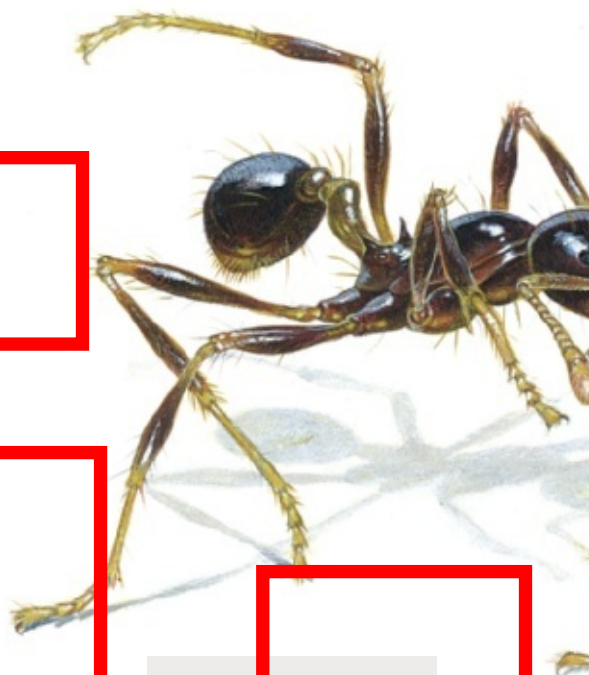
Le combat est si intense, qu'à travers l'objectif de mon appareil photographique, j'en oublie presque que les combattants sont des fourmis. J'ai passé plusieurs mois dans la forêt tropicale malaisienne à suivre ces minuscules insectes, en l'occurrence *Pheidologeton diversus*, la fourmi maraudeuse.

Les entomologistes savent depuis longtemps que certaines espèces de fourmis (et de termites) forment des sociétés très unies, qui comptent des millions d'individus. Ces insectes présentent des comportements complexes, tels que le contrôle de la circulation, la gestion des déchets, l'élevage des pucerons, la culture des champignons, et, plus surprenant encore, la guerre, sous forme d'engagements organisés d'une armée contre une autre, où les deux camps risquent d'être anéantis. En fait, nous ressemblons davantage aux fourmis qu'à nos plus proches parents : les grands singes, qui vivent en sociétés beaucoup

plus structurées. Nous nous ressemblons jusqu'à nos stratégies guerrières ! Pour les fourmis, comme pour l'homme, la guerre implique une étonnante variété de choix tactiques quant aux modes d'attaque et aux décisions stratégiques déterminant où et quand livrer bataille.

Stratégies similaires

Alors que tout les sépare, que ce soit leur biologie ou la structure de leurs sociétés, les fourmis et les hommes ont des tactiques guerrières similaires. Les colonies de fourmis sont surtout composées de femelles stériles, qui travaillent comme ouvrières ou guerrières, parfois de quelques mâles, qui ont une courte durée de vie et participent uniquement à la reproduction, et de une ou plusieurs reines fertiles. Celles-ci sont au centre de la vie de la colonie, parce qu'elles assurent la reproduction, mais elles ne dirigent pas les troupes et n'organisent pas le travail. La colonie fonctionne sans hiérarchie ni chef permanent. La prise de décision est décentralisée, avec des ouvrières qui font des choix pertinents pour le groupe, bien que chacune d'elles ait peu d'informations et malgré l'absence d'un chef, processus dénommé « intelligence



L'ESSENTIEL

✓ Des colonies entières de fourmis, de plusieurs milliers, voire millions, d'individus, partent en guerre contre d'autres colonies pour contrôler un territoire ou une source de nourriture.

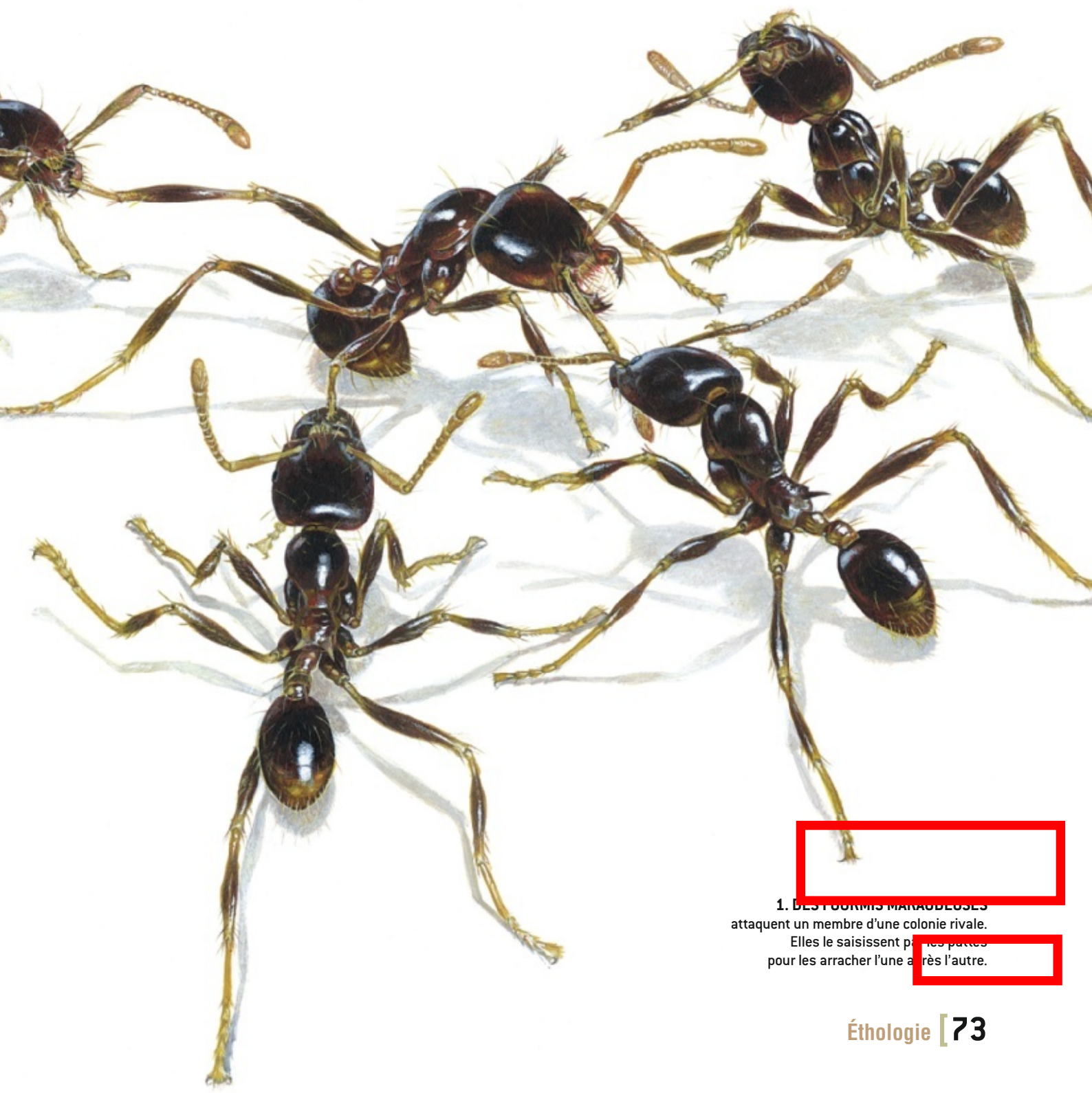
✓ Ces insectes utilisent de nombreuses tactiques qui présentent des similitudes avec celles des hommes.

✓ Les fourmis adaptent leurs stratégies selon divers facteurs : la taille de la colonie, le territoire...

✓ Les fourmis sont totalement dévouées à leur colonie, sont prêtes à sacrifier leur vie pour elle.

© Tim Dawson

et l'art de la guerre



1. DES FOURMIS MARAUDEUSES
attaquent un membre d'une colonie rivale.
Elles le saisissent par les pattes
pour les arracher l'une après l'autre.

en essaim ». Hommes et fourmis combattent leurs ennemis pour des motifs communs, notamment le territoire, la nourriture et même le travail : ainsi, quelques espèces de fourmis transforment en esclaves certains de leurs adversaires.

Les fourmis adaptent leurs tactiques de guerre à l'ennemi. Certaines gagnent les batailles en préparant constamment l'offensive, un comportement qui rappelle que « la rapidité est l'essence même de la guerre » selon Sun Tzu, général chinois du VI^e siècle avant notre ère dans son ouvrage *L'Art de la guerre*. Chez les fourmis guerrières, diverses espèces des régions chaudes du monde entier et la fourmi maraudeuse d'Asie, des centaines, voire des millions d'individus avancent à l'aveugle en rangs serrés, attaquant proies et ennemis indistinctement sur leur passage.

Au Ghana, j'ai observé un tapis grouillant de fourmis ouvrières de l'espèce guerrière *Dorylus nigricans* fouillant une zone de 30 mètres de largeur. Ces fourmis, nommées légionnaires, se déplacent en groupes. Elles tranchent la chair de leurs ennemis ou de leurs proies à l'aide de mâchoires coupantes et peuvent dévorer en un rien de temps des victimes 1 000 fois plus grosses qu'elles. Bien que les vertébrés soient en général capables d'échapper aux fourmis, au Gabon j'ai vu une antilope prise dans un piège, dévorée vivante par une colonie de fourmis légionnaires.

Cette espèce et les fourmis maraudeuses ont des stratégies proches : elles coupent l'accès à la nourriture des fourmis rivales ; leur nombre suffit pour envahir

n'importe quel territoire et prendre ensuite le contrôle des ressources. Les fourmis légionnaires chassent également en groupes pour prendre d'assaut d'autres colonies de fourmis, s'emparer des larves et des nymphes du nid et s'en nourrir.

Les pilanges de fourmis légionnaires et maraudeuses en mouvement rappellent les formations militaires utilisées depuis l'Antiquité sumérienne jusqu'aux régiments de la guerre de Sécession américaine. L'avancée d'un groupe de fourmis sans objectif précis est toujours hasardeuse : elles risquent de ne traverser que des sols stériles et de ne rien trouver. Certaines espèces envoient un nombre réduit d'ouvrières dites éclaireuses, qui recherchent séparément de la nourriture. En se déplaçant sur une étendue plus vaste, pendant que le reste de la colonie reste sur place, elles rencontrent plus de proies, mais aussi plus d'ennemis.

Mais les colonies qui dépendent de fourmis éclaireuses tuent moins d'adversaires. L'éclaireuse doit revenir au nid pour rassembler les troupes, qui suivront l'objet balisé par une phéromone (une substance chimique), déposée par l'éclaireuse. Le temps que ces renforts arrivent, les ennemis ont pu se regrouper ou avoir battu en retraite. En revanche, les ouvrières des fourmis légionnaires ou maraudeuses peuvent obtenir immédiatement l'aide requise, car les renforts marchent juste derrière elles. Chez l'homme

ce comportement de domination rapide, théorisé en 1996 par deux Américains, consiste à déployer une grande force de

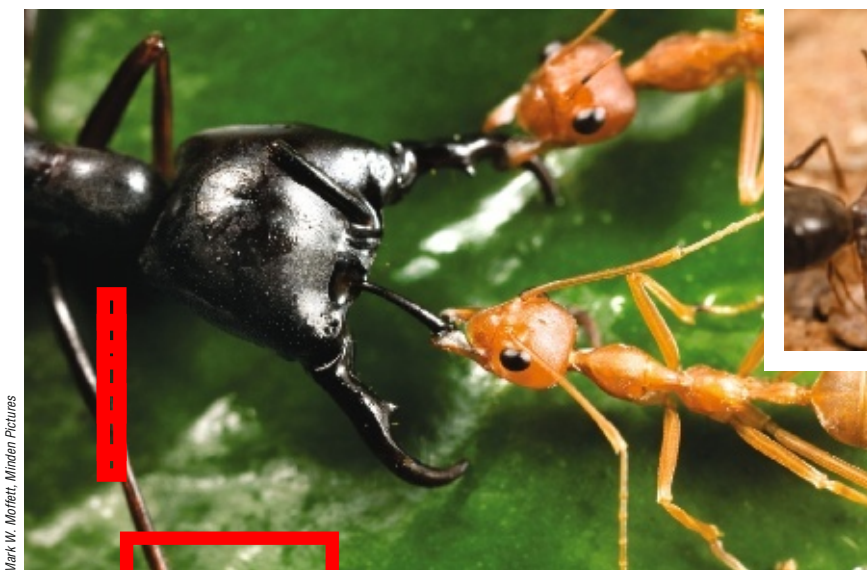
frappe en peu de temps pour surprendre et dominer l'ennemi.

C'est pas seulement le nombre considérable de combattants qui rend les fourmis légionnaires et maraudeuses si meurtrières. Mes recherches sur les fourmis maraudeuses ont montré que les troupes sont déployées de façon à accroître l'efficacité et à réduire le coût par colonie. La position d'un individu dépend de sa taille. Les fourmis ouvrières maraudeuses présentent des différences de taille plus importantes que tout autre espèce de fourmis. Les minuscules ouvrières qualifiées de *minor* (les fantassins mentionnés en début d'article) se déplacent rapidement vers les lignes de front, où elles sont les premières à rencontrer des colonies de fourmis concurrentes ou des proies.

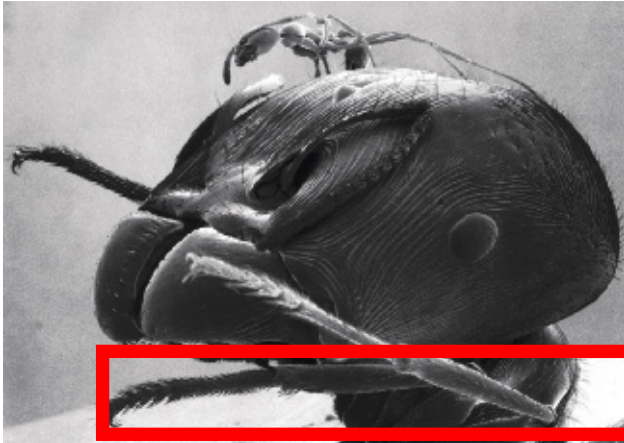
Les petites ouvrières en première ligne

Isolée, une telle ouvrière n'aurait pas plus de chances face à l'ennemi qu'une éclaireuse de même taille appartenant à une espèce pratiquant la chasse individuellement. Mais le nombre important de fourmis ouvrières sur le front constitue une barricade infranchissable, lors d'un raid. Le sacrifice de plusieurs ouvrières permet de ralentir ou de bloquer l'ennemi, jusqu'à ce que les ouvrières de taille moyenne (*media*) et les soldats de grande taille (*majors*) arrivent pour porter le coup fatal. Les soldats sont beau-

coup plus rares que les ouvrières de petite taille, mais sont bien plus dangereux, certains individus pesant jusqu'à 500 fois plus.



2. SUR LE CHAMP DE BATAILLE, des fourmis tisserandes s'attaquent à une fourmi guerrière bien plus puissante (ci-contre) et finissent par la mettre en pièces. Une fourmi porte-misse tient sur un galet pour paraître plus grande, une supercherie tactique qui trompe ses ennemis de plus grande taille (ci-dessus).



Mark W. Moffett

3. UNE PETITE OUVRIÈRE, dite *minor*, d'une espèce de fourmis maraudeuses voyage sur la tête d'une grosse fourmi soldat, dite *major*, de la même espèce (à gauche). Les petites ouvrières attirent les ennemis, tandis que les grandes les tuent. Une fourmi kamikaze rousse projette une colle toxique jaune sur son ennemi, ce qui tue instantanément la fourmi et sa victime (à droite).

Le sacrifice des petites ouvrières sur le front limite la mortalité parmi les ouvrières moyennes et les soldats, qui exigent un fort investissement de la part de la colonie pour assurer leur croissance et leur entretien. Dès lors, la stratégie consiste à faire courir plus de risques aux combattants faciles à remplacer. Les civilisations mésopotamiennes et égyptiennes faisaient de même avec les paysans, nombreux, enrôlés à moindre coût et qui subissaient le plus de pertes. Pendant ce temps, les soldats d'élite, mieux entraînés et dotés d'armes et d'armures plus perfectionnées, étaient relativement épargnés. Les fourmis maraudeuses utilisent aussi la tactique de la guerre d'usure. Elles fauchent les ennemis par petits groupes, jusqu'à ce que l'invasion progresse, au lieu de s'attaquer à l'ensemble de la force ennemie.

Les combats en équations

En plus d'attaquer des espèces ennemies et des proies, les fourmis maraudeuses défendent ardemment les environs de leurs nids et de leur nourriture contre des colonies de leur propre espèce. Lors de telles confrontations, les ouvrières de taille moyenne et les soldats restent en retrait tandis que les petites ouvrières tentent de saisir les pattes de leurs adversaires. Ces combats durent pendant des heures et sont plus meurtriers que les batailles entre les fourmis maraudeuses et les autres espèces avec lesquelles elles sont en compétition. Des centaines de petites fourmis s'entre-déchirent sur quelques dizaines de centimètres carrés.

Ce type de corps-à-corps est fréquent chez les fourmis. La mortalité est élevée, reflétant le faible coût de la main-d'œuvre dans une colonie nombreuse. Certaines fourmis utilisent des armes à longue portée, qui leur permettent de blesser leurs ennemis de loin, ce qui minimise les pertes : ainsi, les fourmis rousses vivant dans les forêts d'Europe et d'Amérique du Nord projettent de l'acide formique sur la tête de l'ennemi, et les fourmis *Dorymyrmex bicolor* de l'Arizona de petits cailloux.

Nigel Franks, de l'Université de Bristol en Angleterre, et ses collègues ont montré que le combat des fourmis guerrières et maraudeuses satisfait aux équations développées pendant la Première Guerre mondiale par l'ingénieur anglais Frederick Lancaster pour expliquer les stratégies et tactiques de forces opposées. Il a montré que s'il y a de nombreux combats simultanés sur un champ de bataille, la supériorité numérique l'emporte sur la puissance de feu. C'est aussi le cas chez les fourmis maraudeuses, dont les soldats de grande taille n'entrent en conflit qu'en cas de danger extrême. Ainsi, des ouvrières de toutes tailles s'attaqueront à un entomologiste assez inconscient pour attaquer leur nid, les soldats lui infligeant les morsures les plus féroces.

Néanmoins, tout comme les équations de Lancaster ne s'appliquent pas à toutes les situations de guerre chez les hommes, elles ne décrivent pas non plus tous les comportements des fourmis guerrières. C'est le cas des fourmis esclavagistes. Certaines d'entre elles volent la couvée d'une colonie cible, pour transformer les jeunes en esclaves, qu'elles élèvent dans

L'AUTEUR



Mark MOFFETT est entomologiste au Muséum d'histoire naturelle de l'Institut Smithsonian à Washington.

BIBLIOGRAPHIE

M. Moffett, *Supercolonies of billions in an invasive ant: what is a society?*, *Behavioral Ecology*, à paraître.

C. Anderson et D. McShea, *Individual versus social complexity in ant colonies*, *Biological Reviews*, vol. 76, n° 2, pp. 211-237, 2001.

G. Boswell et al., *Arms races and the evolution of big brains in societies*, *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 268, n° 1477, pp. 1723-1730, 2001.

B. Hölldobler et E. Wilson, *Voyage chez les fourmis – une exploration scientifique*, Seuil, 1996.

leur propre nid. Les fourmis esclavagistes ont une solide cuticule et des mandibules acérées qui leur confèrent une supériorité au combat. Elles sont toutefois moins nombreuses que les fourmis des colonies où elles prélèvent des esclaves. Pour éviter de se faire massacrer, certaines fourmis esclavagistes produisent une substance chimique de « propagande », qui sème la confusion dans la colonie attaquée et empêche les ouvrières de se liguer contre les envahisseurs. En agissant ainsi, comme l'ont montré N. Franks et Lucas Partridge, de l'Université de Bath, les fourmis esclavagistes adoptent une autre stratégie de Lanchester, qui s'applique parfois aussi aux hommes. D'après cette loi dite linéaire, si les batailles sont livrées sous forme de duels, la victoire est assurée pour les soldats les

plus performants, même s'ils sont moins nombreux. En fait, une colonie assaillie par des esclavagistes laissera souvent les envahisseurs partir sans opposer de résistance.

Chez les fourmis, les risques encourus par un combattant dépendent de sa valeur au sein de la colonie : plus la fourmi est remplaçable, plus elle s'expose. C'est pourquoi les gardiens, placés le long des sentiers où passent les fourmis maraudeuses, sont souvent des ouvrières âgées ou estropiées, qui meurent à peine sur leurs pattes. En 2007, Heby Cassill, de l'Université de Floride du Sud, observa que chez les fourmis de feu seules les plus âgées (de plusieurs mois) s'engageaient dans des combats, tandis que les ouvrières de quelques semaines d'ancienneté et que les individus âgés de quelques jours faignent d'être morts.

en restant immobiles en cas d'attaque. En adoptant ce point de vue de la fourmi, appeler sous les drapeaux des jeunes en pleine santé est parfaitement illogique. Toutefois, des anthropologues ont observé que, au moins dans certaines cultures, les hommes qui ont remporté des victoires ont tendance à avoir plus d'enfants. Cet avantage reproductif justifie-t-il le risque de mourir dans la fleur de l'âge ? La question ne se pose pas chez les fourmis ouvrières, puisqu'elles ne se reproduisent pas.

Le contrôle territorial

On retrouve d'autres stratégies similaires à celles des hommes chez les fourmis tissant des Guirlandes, qui occupent une grande partie de la canopée des forêts tropicales.

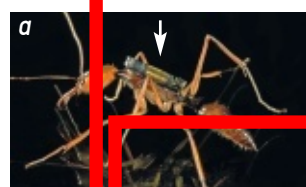
CARTOGRAPHIER LES RÉSEAUX D'INTERACTIONS DANS UNE COLONIE

Une société d'insectes repose sur une multitude d'interactions de ses constituants, les individus. Les insectes échangent des informations de natures très diverses (tactiles, chimiques, comportementales). En réaction, chaque insecte adopte un comportement parmi un répertoire assez limité. Mais comment ce réseau de communication s'adapte-t-il quand un grand nombre d'ouvrières meurent au combat ou que la fourmière est perturbée ?

Le retrait des individus les plus performants, en raison notamment de la redondance des liens connectant les membres de la colonie.

Bien que l'influence de perturbations majeures sur la structure du réseau d'interactions n'ait pas encore été étudiée expérimentalement chez les fourmis, on a commencé à analyser la structure et la dynamique des réseaux d'interactions au sein de telles sociétés.

Les chercheurs ont utilisé des dossards numérotés ou de taches de peinture permettant de les identifier. Grâce à l'observation minutieuse d'une colonie et à l'analyse de longues heures d'enregistrement vidéo, on obtenait une image plus ou moins précise du rôle joué par les différents individus, de leur position dans la hiérarchie et de la répartition des tâches. Ces méthodes ne permettaient toutefois pas de suivre sur le long terme les déplacements des individus.



les processus de répartition des tâches et le transfert des informations dans la colonie.

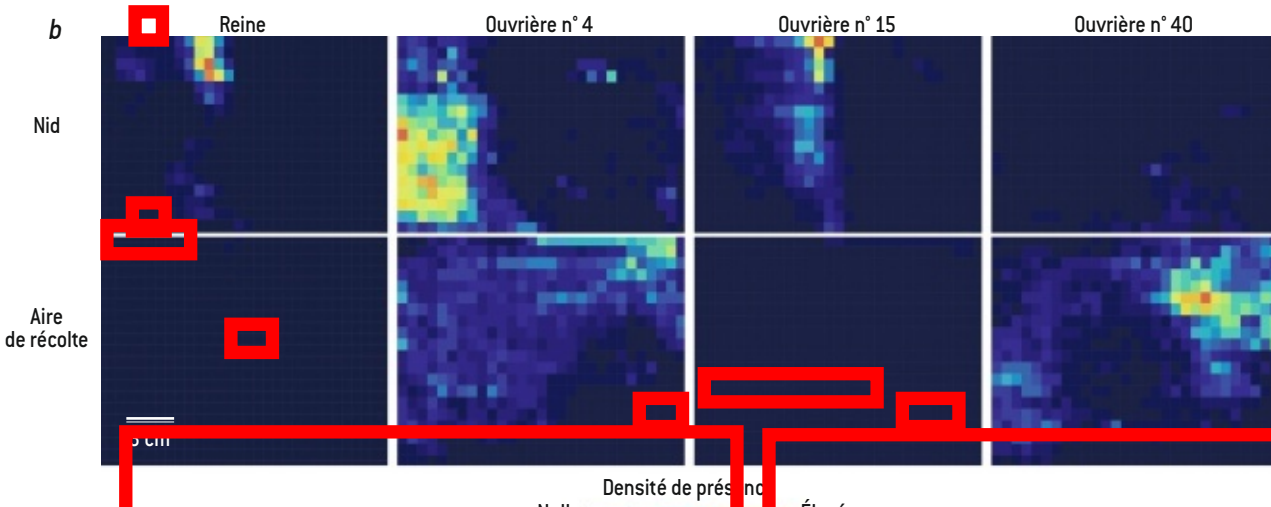
C'est aujourd'hui possible grâce à l'utilisation de puces électroniques, des RFID (de l'anglais

Radio Frequency Identification).

de l'anglais, des RFID (de l'anglais Radio Frequency Identification) sont des dispositifs qui permettent de suivre les déplacements des individus.

analyse avec une précision suffisante la dynamique des interactions, qui constitue une clé pour comprendre

les processus de répartition des tâches et le transfert des informations dans la colonie.



CES CARTES INDICENT L'OCCUPATION DE L'ESPACE par différentes fourmis, au sein du nid et sur l'aire de récolte de nourriture. La reine ne bouge que très peu et reste dans le nid. Les ouvrières ont des compor-

tements variés : certaines sont présentes dans le nid et à l'extérieur (ouvrière n° 4), d'autres restent près de la reine (ouvrière n° 15), d'autres encore sont en permanence sur l'aire de récolte (ouvrière n° 40).

en Afrique, Asie et Australie, où les colonies peuvent s'étendre sur plusieurs arbres et compter jusqu'à 500 000 individus, ce qui est comparable aux populations des fourmis légionnaires, dont elles diffèrent néanmoins par le mode de vie.

Les fourmis légionnaires ne défendent pas de territoire, parce qu'elles errent en rangs serrés à la recherche d'autres espèces de fourmis pour s'en nourrir. Au contraire, les colonies de tisserandes sont installées sur un site et déploient leurs ouvrières sur une vaste étendue pour tenir les concurrents éloignés. Elles contrôlent d'immenses espaces dans les arbres en défendant quelques passages obligés, telle le pied des arbres. Des « nids-casernes » de feuilles, bien placés dans les cimes, permettent de déployer les troupes efficacement.

Les fourmis ouvrières tisserandes sont aussi plus indépendantes que les ouvrières des espèces guerrières. Les légionnaires n'ont aucun esprit d'initiative ou d'autonomie. Les troupes s'éloignent peu de la horde en marche et ont peu besoin de communiquer. Face aux ennemis et aux proies, leur réaction suit le mouvement de l'ensemble. Les fourmis tisserandes se déplacent au contraire, librement et répondent avec plus de souplesse aux différentes situations en présence d'une proie ou d'une menace. Les différences de style rappellent les contrastes entre la rigidité des armées de Frédéric le Grand et les troupes flexibles et mobiles de Napoléon Bonaparte.

Pour détruire un ennemi, les fourmis tisserandes utilisent les mêmes méthodes que les fourmis guerrières : une fourmi

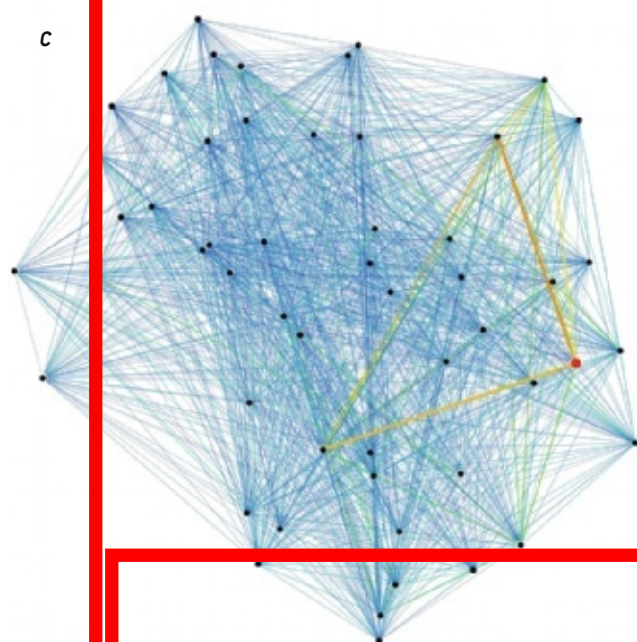
tifs constitués d'une antenne associée à une puce électronique suivie par un émetteur-récepteur. L'émetteur active les radio-étiquettes situées à proximité, qui renvoient leur identification numérique recueillie par le récepteur. Ces radio-étiquettes ont tout d'abord été utilisées pour détecter la présence de fourmis au voisinage des sources de nourriture ainsi que leurs entrées dans le nid et leurs sorties. Au Centre de recherches sur la cognition animale à Toulouse, nous avons développé un dispositif constitué d'un lecteur mobile permettant de balayer à intervalles réguliers la surface d'un nid artificiel et d'aire de récolte utilisée par une colonie pendant plusieurs jours consécutifs. Ce dispositif permet de relever la position et l'identité de chaque fourmi et de reconstruire le réseau d'interactions.

Des fourmis de l'espèce *Odonotomachus hastatus*, équipées d'une radio-étiquette (voir la figure a, flèche), ont été suivies pendant trois semaines. L'analyse de ces données a permis d'établir le réseau d'associations entre individus (voir la figure c) et a mis en évidence une importante disparité dans la connectivité de ce réseau. Certaines fourmis interagissent

ouvrières. Cette analyse a aussi révélé une importante variabilité interindividuelle dans l'occupation de l'espace : certaines fourmis sont présentes surtout dans le nid ou l'aire de récolte alors que d'autres, beaucoup plus mobiles, visitent toutes les zones (voir la figure b). Ces différences de mobilité conditionnent les occasions de rencontre entre fourmis et la connectivité du réseau d'interactions.

Examinons la position occupée par la reine dans le réseau : elle se caractérise par une très faible mobilité et un degré de connectivité très élevé. En revanche, son retrait de la colonie ne modifie pas la structure du réseau d'associations entre ouvrières, ce qui confirme que la reine n'exerce aucun rôle direct dans la coordination des activités réalisées au sein de la colonie. Nous ignorons cependant si les ouvrières très connectées dans le réseau jouent un rôle important dans le fonctionnement de la colonie, en favorisant notamment la propagation de l'information.

L'analyse des réseaux d'interaction chez les insectes sociaux et plus généralement les sociétés animales connaît actuellement un développement considérable, en raison



UN RÉSEAU D'INTERACTION a été reconstitué après avoir suivi les mouvements d'une quarantaine de fourmis (les points). Cette analyse a en outre révélé que la reine (en rouge) est très connectée aux autres membres de la colonie. Les traits jaunes et orange indiquent les contacts privilégiés. Par ailleurs, on peut montrer que son retrait ne perturbe pas le réseau de communications entre les ouvrières.

que des réseaux complexes. La théorie des graphes, à travers l'analyse de la topologie des réseaux, a permis de mieux comprendre leurs propriétés. Le principal défi auquel sont

l'ensemble des congénères ; d'autres, au contraire, comme la reine, ont des contacts privilégiés avec certaines

tes permettant l'automatisation du recueil de données, mais aussi grâce aux outils développés par la physi-

cheurs concerne l'analyse temporelle de la dynamique des réseaux. Le développement de ces approches

ouvre de nouvelles perspectives pour mieux comprendre le fonctionnement des sociétés où les interactions individuelles jouent un rôle déterminant.

Raphaël Dussan
et Guy Theraulaz

CNRS – Centre de recherche sur la cognition animale



4. LES FOURMIS TISSERANDES utilisent des feuilles pour construire leur nid. Elles les assemblent avec des fils de soie produits par les larves.

tisserandes émet une phéromone de recrutement de courte portée (produite par une glande dite sternale), ce qui attire les renforts à proximité, lesquels l'aident à la mise à mort. Par ailleurs, quand une ouvrière revient d'un combat avec une autre colonie, elle effectue des mouvements saccadés en passant près d'autres fourmis pour les alerter du combat en cours. En même temps, elle dépose une odeur différente le long de son trajet, une phéromone produite par une glande rectale qui indique aux membres de sa colonie le chemin à suivre jusqu'au champ de bataille. Enfin, pour revendiquer un espace préalablement inoccupé, les ouvrières utilisent un autre signal : elles déposent à l'endroit concerné, un peu comme les chiens marquent leur territoire.

Une question de taille

Pour les fourmis comme pour les hommes, la propension à s'engager dans une guerre est liée, au moins en partie, à la taille de la colonie. De petits groupes mènent rarement de grandes batailles. Comme les hommes chasseurs-cueilleurs, qui sont souvent nomades et ont tendance à vivre au jour le jour, les plus petites colonies de fourmis de quelques dizaines d'individus ne construisent pas d'infrastructures fixes, de sentiers ni de lieux d'habitation, et n'ont pas de réserves de nourriture, qui vaudraient de mourir pour les défendre. Lors de conflits entre groupes, ces fourmis, comme leurs homologues humains, préfèrent souvent la fuite au combat.

Les sociétés de taille intermédiaire disposent probablement de plus de ressources à défendre, mais sont encore assez petites pour éviter de mettre en danger leurs troupeaux. Les fourmis pot-de-miel du Sud-Ouest des États-Unis, qui vivent en groupes de taille moyenne de quelques milliers d'individus, illustrent cette minimisation des risques. Pour s'approprier une proie ou pour affronter un groupe entier, une colonie de fourmis pot-de-miel peut organiser un « tournoi »

près d'un nid voisin. Elles occupent ainsi l'ennemi, évitant une bataille meurtrière. Pendant le tournoi, les fourmis rivales tournent les unes autour des autres dressées sur leurs six pattes. Ce comportement de « marche sur échasses » ressemble aux démonstrations cérémonielles de force, le plus souvent sans effusion de sang, courantes chez les hommes vivant en petits clans, comme l'ont fait remarquer les biologistes Bert Hölldobler, de l'Université d'État de l'Arizona, et Edward Wilson, de l'Université Harvard.

Avec un peu de chance, la colonie dont les fourmis ainsi dressées sont les plus petites et les plus faibles peut se retirer sans pertes. Le camp gagnant en profite pour dévorer la couvée des perdantes et enlever les fourmis-réservoirs. Ces ouvrières ont l'abdomen rempli de miellat, qu'elles régurgitent à la demande pour les autres. Les vainqueurs rapportent les fourmis-réservoirs jusqu'à leur nid et conservent ces garnes-banque vivantes comme esclaves. Pour échapper aux conséquences d'une défaite, des ouvrières de reconnaissance surveillent le tournoi pour organiser la retraite si nécessaire.

En revanche, dans les colonies matures composées de centaines de milliers d'individus, les affrontements sont fréquents. Les entomologistes ont eu tendance à considérer que ces grandes sociétés d'insectes étaient inefficaces, car elles produisent, en moyenne, moins de reines et de mâles que ne le font les petits groupes. Je les considère, au contraire, comme étant si productives qu'elles ont la possibilité d'investir non seulement dans la reproduction, mais également dans une main-d'œuvre plus abondante que ce qu'exige l'entretien de la colonie, un peu comme les organismes fabriquent des réserves de tissu adipeux dont nous puisons en cas de besoin. Il est probable que chaque fourmi a moins de travail à fournir dans les grandes colonies. Les fourmis inactives, de plus en plus nombreuses, grossissent les rangs d'une armée de réserve lors d'affrontements avec des ennemis. De même, la plupart des anthropologues estiment que la guerre humaine est apparue qu'après l'explosion démographique favorisée par le début de l'agriculture.

Superorganismes et supercolonies

En fait, la capacité de conduire diverses formes de guerre résulterait de ce qu'une société de fourmis est une entité se comportant comme un organisme vivant. Les cellules se reconnaissent grâce à des molécules présentes à leur surface ; un système immunitaire efficace attaque toute cellule présentant des signaux de reconnaissance différents. Dans la plupart des colonies, les fourmis se reconnaissent aussi grâce à des molécules spécifiques de la colonie, des phéromones présentes à la surface de leur corps. Elles évitent ou attaquent les individus émettant une odeur différente. Changer de camp est impossible pour les fourmis.

adultes, qui, à de rares exceptions près, appartiennent à leurs colonies, de la naissance jusqu'à leur mort.

Cependant, certaines ouvrières agissent parfois contre l'intérêt de leur colonie. Elles tentent de se reproduire, mais leur projet échoue généralement, un peu comme il arrive que des conflits surviennent entre des gènes. En général, l'identification à leur colonie est la seule carte d'identité des fourmis, car elles forment des sociétés anonymes : au-delà de la distinction entre castes – celles des soldats et celles des reines –, les fourmis ouvrières ne se reconnaissent pas en tant qu'individus. Parce qu'elles font partie d'un superorganisme, la mort d'une ouvrière a peu d'importance, et leur engagement social sans faille est leur seule caractéristique.

L'exemple le plus stupéfiant d'allégeance à la colonie est celui de l'espèce *Linepithema humile*. Originaires d'Argentine, elle s'est répandue dans de nombreuses autres régions du monde, transportée par des bateaux de marchandises. En Californie, elle forme une supercolonie qui s'étend de San Francisco jusqu'à la frontière mexicaine et pourrait rassembler des milliards d'individus, unis d'un bout à l'autre par la même identité « nationale ». Tous les mois, des millions de fourmis argentines meurent au cours des combats qui s'étirent sur des kilomètres autour de San Diego, où des affrontements ont lieu avec trois autres colonies dans des guerres qui durent peut-être depuis l'arrivée de l'espèce, il y a une centaine d'années.

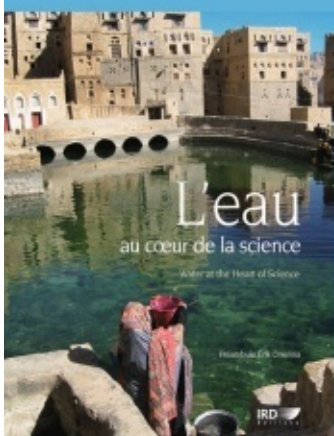
Les équations de Lanchester s'appliquent parfaitement à ces combats. Les ouvrières argentines sont minuscules, constamment remplacées par des renforts inépuisables à mesure qu'elles périssent, et leur densité atteint plusieurs millions pour quelques centaines de mètres carrés. En surpassant largement en nombre toute espèce indigène qu'elles rencontrent, les supercolonies exercent un contrôle absolu du territoire, au moins tout concurrent qu'elles croisent.

Qu'est-ce qui confère à ces fourmis argentines leur attitude implacable au combat ? Chez de nombreuses espèces de fourmis, mais cela est vrai pour l'homme aussi, après un conflit, le taux de mortalité baisse, car les deux parties s'établissent le long de frontières délimitant une zone neutre. Dans les plaines inondables, d'où sont originaires les fourmis argentines, les colonies en guerre doivent cependant interrompre le combat chaque fois que les eaux montent et les repoussent vers des terrains plus élevés. Pour autant, la guerre ne s'arrête jamais. Les affrontements continuent sans répit, décennie après décennie.

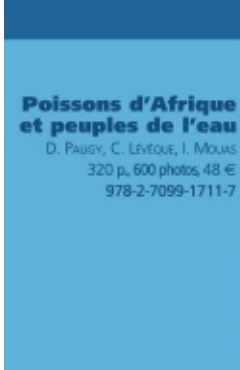
L'expansion agressive des supercolonies de fourmis rappelle comment des superpuissances coloniales humaines ont autrefois éradiqué des groupes plus petits, des Amérindiens aux Aborigènes d'Australie. Heureusement, les hommes ne constituent pas des supercolonies de fourmis : notre allégeance peut basculer au fil du temps, pour accueillir des immigrants permettant à différentes nations de fusionner. Bien que la guerre soit peut-être inéluctable chez bon nombre de fourmis, pour nous, elle devrait l'être évitable. ■


Institut de recherche pour le développement

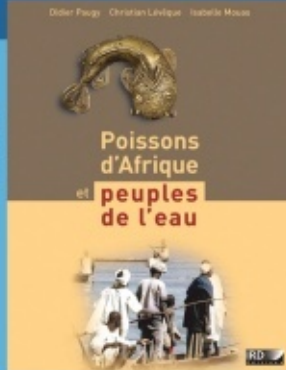
Un éditeur pour le développement



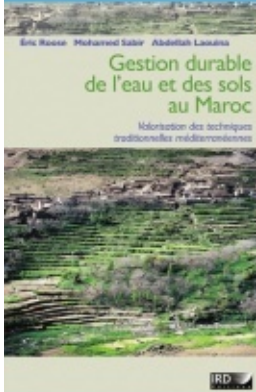
L'eau
au cœur de la science
Water at the Heart of Science
160 p., 138 photos, 35 €
978-2-7099-1723-0



Poissons d'Afrique et peuples de l'eau
D. PAUGY, C. LEVEQUE, I. MOUAS
320 p., 600 photos, 48 €
978-2-7099-1711-7



Poissons d'Afrique et peuples de l'eau
D. PAUGY, C. LEVEQUE, I. MOUAS



Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc
Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes
É. ROOSE, M. SABIR, A. LAQUINA
344 p., 46 €
978-2-7099-1683-7

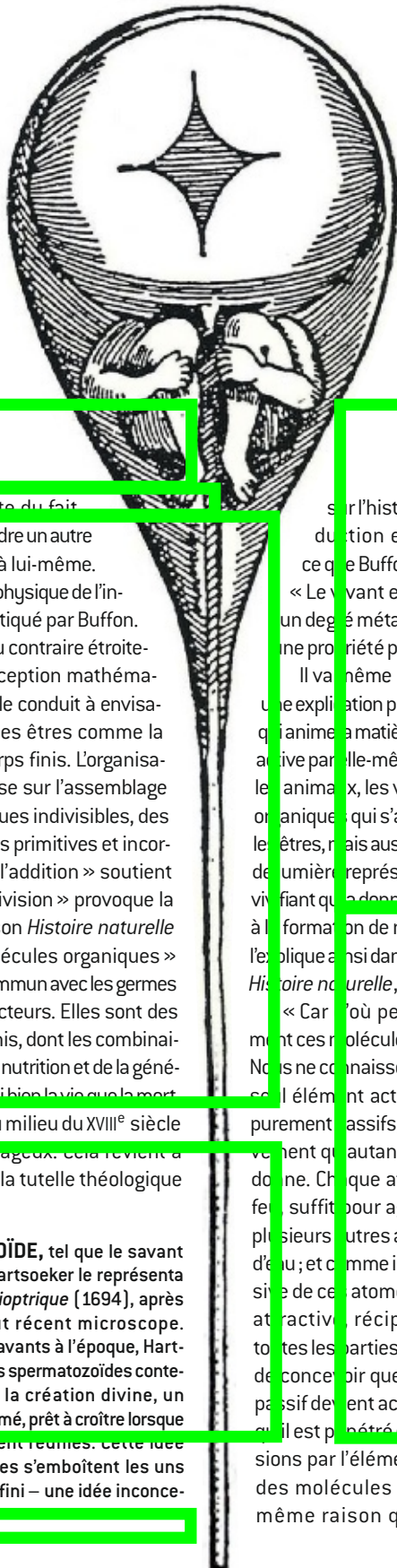


La Sierra Madre occidentale
Un château d'eau menacé
L. DESCHOUX et al.
328 p., 42 €
978-2-7099-1582-0



La Sierra Madre occidentale
Un château d'eau menacé
L. DESCHOUX et al.

Diffusion libraires : Eyrolles/Géodif
Vente par correspondance : IRD Diffusion
32, av. Varagnat - F 93143 Bondy cedex
Tél : 01 48 02 56 49 Fax : 01 48 02 79 09
diffusion@ird.fr
www.ird.fr



pour rendre compte du fait qu'un individu engendre un autre individu semblable à lui-même.

Cet usage métaphysique de l'infini est vivement critiqué par Buffon. Son approche est au contraire étroitement liée à sa conception mathématique de l'infini, qui le conduit à envisager la génération des êtres comme la combinaison de corps finis. L'organisation des êtres repose sur l'assemblage d'éléments organiques indivisibles, des « parties organiques primitives et incorruptibles » dont « l'addition » soutient la vie et dont la « division » provoque la mort, écrit-il dans son *Histoire naturelle* en 1749. Ces « molécules organiques » n'ont pas de point commun avec les germes infinis de ses détracteurs. Elles sont des objets physiques finis, dont les combinaisons, fonctions de la nutrition et de la génération, donnent aussi bien la vie que la mort.

Affirmer cela au milieu du XVIII^e siècle en France est courageux : cela revient à demander la fin de la tutelle théologique

2. UN SPERMATOZOÏDE, tel que le savant hollandais Nicolas Hartsoeker le représente dans son *Essay de dioptrique* (1694), après observation au tout récent microscope. Comme nombre de savants à l'époque, Hartsoeker pensait que les spermatozoïdes contenaient déjà, depuis la création divine, un minuscule être préformé, prêt à croître lorsque les conditions seraient réunies. Cette idée implique que les êtres s'emboîtent les uns dans les autres à l'infini – une idée inconcevable pour Buffon.

sur l'histoire naturelle par sa traduction en termes physiques, ce que Buffon énonce ouvertement : « Le vivant et l'animé, au lieu d'être un degré métaphysique des êtres, est une propriété physique de la matière. »

Il va même plus loin en fournissant une explication physique du principe actif qui anime la matière. Pour lui, toute matière active par elle-même est « matière vive » : les animaux, les végétaux, les molécules organiques qui s'assemblent pour former les êtres, mais aussi la lumière. Les atomes de lumière représentent même l'élément vivifiant qui a donné l'impulsion nécessaire à la formation de molécules organiques. Il l'explique ainsi dans un supplément de son *Histoire naturelle*, en 1777 :

« Car, où peuvent venir primitivement ces molécules organiques vivantes ! Nous ne connaissons dans la nature qu'un seul élément actif, les trois autres sont purement passifs, et ne prennent de mouvement qu'autant que le premier leur en donne. Chaque atome de lumière ou de feu suffit pour agiter et pénétrer un ou plusieurs autres atomes d'air, de terre ou d'eau ; et comme il se joint à la force impulsive de ces atomes de chaleur une force attractive, réciproque et commune à toutes les parties de la matière, il est aisé de concevoir que chaque atome brut et passif devient actif et vivant au moment qu'il est pénétré dans toutes ses dimensions par l'élément vivifiant, le nombre des molécules vivantes est donc en même raison que celui des émana-

tions de cette chaleur douce, qu'on doit regarder comme l'élément primitif de la vie. »

Ainsi, pour Buffon, les atomes de lumière n'auraient rien pu faire sans la « force attractive » propre à toute matière. L'héritage newtonien est évident. Non seulement Buffon se réfère à l'attraction et à une entité physique (la lumière), mais, surtout, il conçoit la quantité des molécules organiques en fonction de la quantité des atomes de lumière. Autrement dit, il renvoie à une possible mise en équation des objets de l'histoire naturelle. Les êtres vivants ne sont plus ces objets mystérieux, irréductibles, expliqués par une organisation créée et infinie. Ils sont voués au même traitement mathématique que les corps passifs.

La génération spontanée... contre le divin

Paradoxalement, l'idée qu'une partie des êtres vivants sont produits par génération spontanée, qui a connu un grand succès dans la seconde moitié du XVIII^e siècle, semble elle aussi être née de cette volonté de s'affranchir d'une explication divine. À partir des années 1760, pour éviter de recourir à une intervention divine, tous les naturalistes influencés par Buffon supposent par exemple que de minuscules organismes vivants – des animalcules – peuvent apparaître spontanément dans des infusions de viande ou de lait (voir l'encadré page 83). Que représente ce

concept de génération spontanée pour eux ? Non seulement il permet d'expliquer la génération d'êtres microscopiques observés pour la première fois sous le microscope, mais, surtout, il fournit un modèle pour penser une origine physique des premiers êtres vivants. Autrement dit, la génération spontanée dispense de Dieu pour comprendre l'origine de la vie et ouvre la voie à une approche globale des phénomènes physiques et biologiques. Les travaux de Jean-Baptiste de Lamarck illustrent bien cet effort pour réconcilier les règnes que la vieille histoire naturelle tenait séparés – le minéral, le végétal et l'animal.

Lamarck, l'un des premiers naturalistes à utiliser le terme « biologie », est aussi l'un des derniers disciples de Buffon au Jardin des Plantes, à Paris. Grâce à Buffon, il est nommé à l'Académie en 1779. Il a probablement été influencé par ses concepts newtoniens et par son approche physicaliste de l'histoire naturelle. La proximité de Lamarck avec Buffon apparaît lorsqu'il s'interroge sur l'origine du mouvement des êtres vivants. Pour lui aussi, une entité physique particulière en est la source. Il la nomme le « feu éthéré », c'est-à-dire la lumière. Elle est responsable de l'apparition des premiers organismes vivants et donne vie continuellement à des organismes simples par génération spontanée. Le passage de la matière brute à la vie ainsi conçu comme un processus physique, dans lequel la lumière « a, depuis que notre globe existe, continuellement transformé et transforme encore chaque jour, en corps vivant du premier degré, soit animal, soit végétal, les matières les plus propres dans leurs parties à prendre la forme, l'arrangement et le mouvement qui les organise et leur donne la vie ».

Cette interprétation des processus organiques en termes physiques conduit Lamarck, comme de nombreux naturalistes contemporains, à soutenir l'idée de générations spontanées. Au début des années 1860, soit une trentaine d'années après la mort de Lamarck, cette idée deviendra le symbole de l'erreur scientifique lorsque, à l'issue d'une vive querelle entre Louis Pasteur et Félix Arché, le P. Brochet, naturaliste et directeur du Muséum

d'histoire naturelle de Rouen, Pasteur démontrera le rôle de la contamination microbienne dans l'apparition de la vie en laboratoire. Mais, au début du XIX^e siècle, lorsque Lamarck énonce l'idée de générations spontanées, celle-ci exprime surtout une critique des séparations figées maintenues entre le vivant et l'inerte par l'ancienne histoire naturelle. Cette vision de l'histoire naturelle interdit de penser le vivant en termes de variation et d'évolution, et l'idée de génération spontanée permet au contraire de se représenter l'origine de la vie par des mécanismes naturels. Pour Lamarck, de ces relations entre certaines matières inertes et la lumière « naquirent et naissent encore tous les jours des mains de la nature même une multitude de corpuscules gélatineux, les uns animalisés, les autres végétalisés, qui ont la forme la plus simple et qui ne

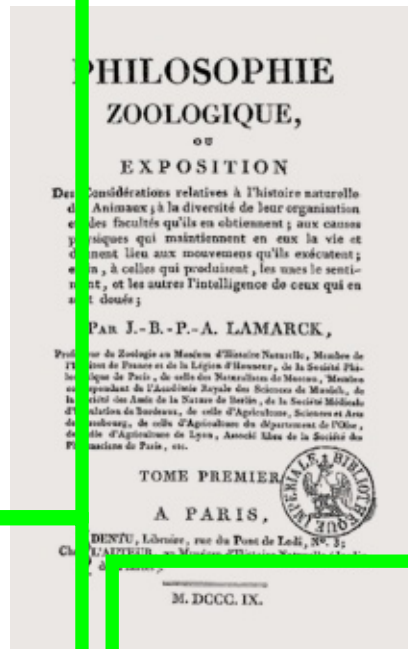
sont qu'une faible ébauche d'individus doués de la vie ». La possibilité d'une origine physique de la vie est soutenue sans réserve.

Les êtres évoluent en suivant des lois physiques

L'influence des idées de Newton telles que relayées par Buffon se retrouve aussi chez Lamarck lorsqu'il applique aux êtres vivants le concept de « rapport ». Chez Newton, le rapport est ce qui relie deux quantités ; aujourd'hui, on parlerait de fonction ou de loi physique traitée sous forme d'équations. Pour les deux naturalistes, le terme « rapport » renvoie à l'idée d'une dépendance entre des quantités : liées par ce rapport, les quantités varient proportionnellement, en fonction des circonstances. Parler de rapports à propos des êtres vivants implique que les êtres vivants sont soumis aux mêmes forces physiques que les autres corps – les corps inertes –, et qu'il est possible d'effectuer des mesures sur eux, afin d'en dégager des grandeurs physiques.

La définition de la vie que Lamarck propose dans sa *Philosophie zoologique* (1809) témoigne de cette idée : « La vie, considérée dans tout corps qui la possède, résulte uniquement des relations qui existent entre les trois objets suivants ; savoir : les parties contenant et dans un état approprié de ce corps ; les fluides contenus qui y sont en mouvement ; et la cause excitatrice des mouvements et des changements qui s'y opèrent. » Lamarck ne considère pas la vie comme une force spéciale qui serait d'une essence différente de celle de la matière inerte. Il conçoit au contraire la vie comme un ensemble de rapports entre des entités physiques.

Lamarck se distingue toutefois de Buffon en considérant que les rapports qui sous-tendent les êtres vivants s'inscrivent dans une temporalité. Pour Lamarck, les êtres vivants progressent dans l'organisation du vivant en se transformant au cours du temps. Ces progrès successifs dépendent d'un mouvement dans lequel l'organisme le plus simple conduit au plus com-



3. **DÈS LA PAGE DE GARDE** de sa *Philosophie zoologique* (1809), Lamarck met en avant son approche physique des sciences naturelles. Il annonce qu'il expose ici ses « considérations relatives à l'histoire naturelle des animaux ; à la diversité de leur organisation et des facultés qu'ils en obtiennent ; aux causes physiques qui maintiennent en eux la vie et donnent lieu aux mouvements qu'ils exécutent ; enfin, à celles qui produisent, les uns le sentiment, les autres l'intelligence de ceux qui en sont doués ».

posé, non pas en raison d'un ordre préétabli, mais par des assemblages entre les corps au fil du temps. Le fil conducteur de ces transformations est la conservation des rapports entre les masses respectives des êtres vivants à mesure des transformations. C'est ce que Lamarck explique ainsi, dans ses *Recherches sur l'organisation des corps vivants* [1802] :

« Remontez du plus simple au plus composé ; partez de l'animalcule le plus imparfait, et élevez-vous le long de l'échelle jusqu'à l'animal le plus riche en organisation et en facultés ; conservez partout l'ordre des rapports dans les masses ; alors vous tiendrez le véritable fil qui lie toutes les productions de la nature, vous aurez une juste idée de sa marche, et vous serez convaincus que les plus simples de ses productions vivantes ont successivement donné l'existence à toutes les autres. »

C'est, avec l'hérédité des caractères acquis, une des deux grandes idées que Lamarck développera pour étayer sa théorie selon laquelle les espèces se transforment, ouvrant ainsi la voie à l'idée d'évolution.

Laïciser l'histoire naturelle

Lamarck ne s'arrête pas là. Il estompe encore les frontières entre le vivant et l'inerte en décrivant comment la chimie gouverne les deux règnes. Pour lui, la spécificité du vivant repose sur une particularité chimique au sein des êtres : les parties de leur corps ont la capacité d'assembler des molécules et de produire de la « matière organisée », alors que les corps inertes ne peuvent que se dissoudre. Ainsi, les êtres produisent de la matière organisée ou composée, et les corps bruts, c'est-à-dire ce qui a perdu la faculté de se composer, se dissolvent. En d'autres termes, loin d'être séparés, comme le pensent les vitalistes ou les partisans d'une théologie naturelle, le vivant et l'inerte entretiennent une relation fondamentale dans la nature.

Les concepts physiques sont ainsi bien présents dans la biologie de Lamarck. Ce n'est pas en opposant le vivant au reste du monde qu'il l'a élaborée, mais en traduisant en termes physiques ce que l'a-

Les animalcules des infusions		
« L'infusion de farine de blé broyée et mise dans l'eau produit de petits filets rayonnants qui ont un mouvement oscillatoire, et d'autres filets en massue, ou semblables à des masses, qui restent immobiles. [...] La quantité de petites molécules animales sort des molécules pareilles d'entre les filets. Ces	molécules ne changent pas de forme et ne deviennent pas des anguilles. Voilà donc deux ou trois sortes d'animaux ou de corps mouvants organisés qui sortent de la farine fermentante. [...] Les animalcules des infusions ont un mouvement assez vif et très varié, suivant les espèces, oscil-	latoire dans les uns, en avant dans d'autres, circulaire ou spiral dans d'autres, mais toujours spontané. [...] Les animalcules semblent chercher à éviter de passer dans un endroit où il y a du feu, du froid, du vent, etc. »
Extrait du Cours d'histoire naturelle de Michel Adanson, 1772		

cienne histoire naturelle maintenait dans des règles séparées.

Buffon et Lamarck ne sont pas les seuls naturalistes influencés par les concepts de la physique newtonienne. Ce mouvement d'interprétation de l'histoire naturelle en termes physiques a concerné d'autres savants, tels Michel Adanson, Philippe Bertrand ou Jean Claude de La Méthérie. Ce dernier a une position originale, car il a totalement fondé sur la physique son discours sur les êtres vivants en affirmant qu'un processus de « cristallisation » analogue aux phénomènes géologiques est à l'origine de la vie. Il écrit ainsi en 1804, dans ses *Considérations sur les êtres organisés*, que les vivants sont « de belles machines hydrauliques qui se forment, croissent et se décomposent par des moyens physiques ». Cette explication géologique se révèle étonnée, mais elle témoigne de la volonté, de plus en plus marquée au XIX^e siècle, d'abolir la frontière entre le vivant et le reste de la nature.

Les diverses théories du vivant inspirées des idées newtoniennes n'ont pas triomphé. Elles ont été supplantées à la suite de différentes découvertes, notamment sur la cellule. Néanmoins, elles constituent une étape méthodologique décisive, qui se confond avec la naissance de la biologie. Là où leurs concurrents recouraient au mieux à une force vitale matérielle ni spirituelle, ou au pire à une intervention divine pour expliquer ce qui anime le vivant, Buffon et ses disciples ont montré que des explications naturelles étaient envisageables. L'apport majeur de la physique à la biologie a sans nul doute été la laïcisation de ses énoncés.

L'AUTEUR



Pascal CHARBONNAT est historien et philosophe des sciences, membre de l'Institut de recherches philosophiques (IREPH) de l'Université Paris Ouest Nanterre La Défense.

✓ À ÉCOUTER

Jeudi 7 juin, Pascal Charbonnat reviendra sur la façon dont Newton a inspiré la biologie dans la partie « Actualités » de l'émission *La marche des sciences* sur France Culture de 14 h à 15 h. www.franceculture.com

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. Charbonnat, *Quand les sciences dialoguent avec la métaphysique*, Vuibert, 2011.

La sélection de livres

■ POUR LA SCIENCE

Après avoir exploré l'Univers quantique qui fait l'objet de la Une de *Pour la Science*, explorez le monde de la physique avec des livres sur la supraconductivité, les phénomènes lumineux, les scientifiques qui ont marqué cette discipline...

En partenariat
avec les éditeurs

Belin
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 177

Tous ces livres sont
également disponibles
en librairie.

Dialogues sur l'émergence

Nouveauté

Rémy Lesenne

Pour expliquer l'apparition de nouveautés dans la nature, de la particule élémentaire jusqu'aux galaxies, de l'amibe jusqu'à l'homme, il manque une nouvelle approche scientifique.

La complexité de ces phénomènes... Les scientifiques et les philosophes l'ont nommée émergence.

Réf. 090584*

Éditions Le Pommier 2012

288 pages – 23,00 euros – ISBN 978-2-7465-0584-1

Matière et matériaux

Étienne Gajon, Alice Pedregosa, Béatrice Salvat

Les êtres vivants, et notamment l'homme, ont façonné la matière pour leur usage, la transformant en matériau pour se déplacer, se nourrir, bâtir, se vêtir, voir s'embellir et créer des œuvres d'art. Mêlant biologie, physique et chimie, cet ouvrage propose un passionnant voyage dans toutes les dimensions de la matière...

Éditions Belin / Pour la Science 2010

336 pages – 27,90 euros – ISBN 978-2-7011-5182-3

Prix Roberval Grand Public 2011

Réf. 005182

Pierre-Gilles de Gennes

L'enchanteur de la physique

Les génies de la science n°40 – août / octobre 2009

96 pages – 6,90 euros

Qui était Pierre-Gilles de Gennes ? Comment s'est construit son génie ?

Intéressant aux cas réels et complexes délaissés par les autres théoriciens, il a adopté une approche plus intuitive des problèmes. Avec cette biographie et ce numéro de la revue *Les génies de la Science*, replongez-vous dans la vie et les travaux de l'un des physiciens les plus brillants de sa génération, prix Nobel de physique en 1991.

Les marchands de doute

Naomi Oreskes et Erik M. Conway
traduit par Jacques Treiner

Écrit comme une enquête, cet ouvrage témoigne de l'importance des faits scientifiques dans le débat public, et conduit à une réflexion sur la vulnérabilité de notre société face aux « marchands de doute »... Remarquablement documenté, il décrypte la stratégie qui a été mise en place, en Amérique du Nord, pour semer le doute sur diverses questions sociales et environnementales : tabagisme, climat...

Éditions Le Pommier 2012

528 pages – 29 euros – ISBN 978-2-7465-0567-4

Nouveauté

les marchands
de doute
naomi oreskes
erik m. conway

Réf. 090567*

Nouveauté

dialogues
sur
l'émergence
rémy lesenne

Matière
et matériaux
étienne gajon
alice pedregosa
béatrice salvat



LOGIQUE & CALCUL

La cryptographie visuelle

Une information cachée peut apparaître instantanément à notre œil qui, presque aussi bien qu'un ordinateur, l'extrait d'images arisées.

Jean-Paul DELAHAYE

La moindre des qualités que doit posséder le homme d'honneur consiste à garder un secret. La plus grande consiste à oublier ce secret.

Al-Muhallab (672-720)

La cryptographie moderne propose des méthodes nouvelles et parfois extraordinaires pour cacher de l'information, puis, au prix de quelques calculs, pour la retrouver. L'ordinateur joue un rôle central : le plus souvent, il n'est pas envisageable de s'en passer, ni pour chiffrer ni pour déchiffrer le message caché.

Il existe cependant une famille de procédés où l'ordinateur n'est pas obligatoire

pour le chiffrage. L'œil humain, associé à la puissance de calcul du système visuel de notre cerveau, sait opérer le calcul qui extrait un message clair de données aléatoires et réussit l'opération avec une surprise et une efficacité.

La « cryptographie visuelle » est le domaine spécialisé de la cryptographie qui s'occupe de développer et de perfectionner ce type de méthodes, nées en 1994 d'un travail de Roni Naor et Adi Shamir (le S du système de cryptage RSA).

La méthode de cryptographie visuelle de base est fondée sur le principe du « masque jetable ». Nous partons d'une image M (le masque) dont les pixels, uniquement noirs ou blancs, ont été tirés au hasard, et d'une

image S de même taille, elle aussi composée uniquement de pixels noirs ou blancs, mais qui représentent le secret. L'image S, qu'on souhaite cacher et faire parvenir à un correspondant, peut être un dessin, une photo ou un texte, l'essentiel étant qu'elle soit de la même taille exactement que M et qu'elle ne comporte que des pixels noirs ou blancs.

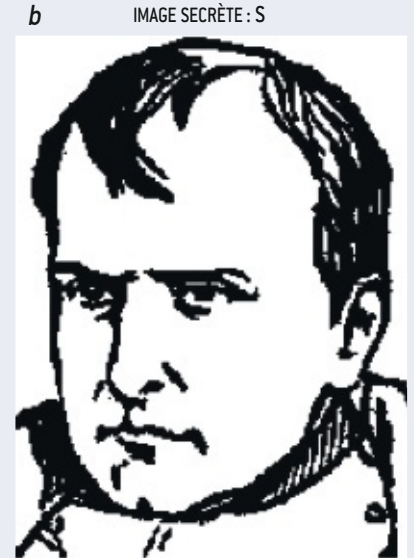
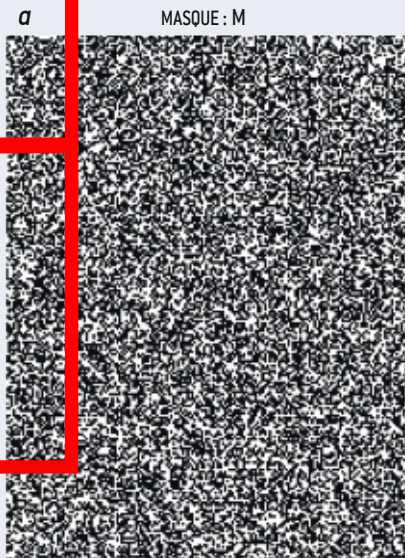
Combiner le masque et le secret

À l'aide d'un logiciel de dessin ou d'un programme, on opère le « ou exclusif » (en informatique, on le note XOR) entre les pixels de M et ceux de S. Cela donne une image chiffrée C. En clair : pour chaque emplacement

1. La méthode du masque jetable

Les pixels du masque M (a) sont choisis aléatoirement, noirs ou blancs. L'image secrète est S (b). L'image chiffrée C (c), de même taille que M, est calculée informatiquement en opérant un « ou exclusif », noté XOR, entre M et S. Les pixels de C sont tous les deux blancs ou tous les deux noirs, sinon il est noir. L'image chiffrée C semble aléatoire, comme M.

La superposition d'un transparent sur lequel est imprimé M et d'un transparent sur lequel est imprimé C fait apparaître l'image secrète S plongée dans du « gris » (d). L'œil extrait l'information secrète. Cette superposition (M OU C) correspond à l'opération logique OU entre les deux images. Si l'on dispose de versions informatiques de M et de S, on peut opérer le OU EXCLUSIF (XOR) entre M et S. Les lecteurs souhaitant disposer des images ci-contre sous forme de fichiers informatiques les trouveront en téléchargement sur <http://www.cnil.fr/~delahaye> 16.



de pixel, si le pixel de M est le même que celui de S , on dessine sur C un pixel blanc, sinon on dessine un pixel noir. Le message chiffré C résulte ainsi d'un XOR entre le masque M et le secret S , c'est-à-dire $C = M \text{ XOR } S$.

Après avoir créé les images M et C , si vous imprimez M et C sur des transparents, vous constaterez que la superposition de M et de C fait apparaître S . Si vous disposez d'un ordinateur, vous verrez encore mieux l'image S en opérant un XOR entre M et C (voir l'encadré 1).

Voici maintenant comment utiliser ce procédé pour faire circuler des informations secrètes et les envoyer à quelqu'un ne disposant pas d'ordinateur, cela d'une manière parfaitement sûre.

Alain souhaite envoyer des messages secrets à Béatrice. Ils se rencontrent une première fois et produisent une série d'images aléatoires des masques $M_1, M_2, \dots, M_n$, dont ils gardent chacun une copie et que bien sûr personne d'autre ne devra connaître. Ils peuvent aussi convenir de ces masques secrets en les faisant circuler sur le réseau : Alain les crée et les envoie à Béatrice, ou l'inverse. Cependant, si on utilise le réseau, il faut être certain au moment de l'échange des images $M_1, M_2, \dots, M_n$ que personne

d'autre ne prend connaissance. C'est possible en utilisant un canal de communication protégé ou en utilisant un procédé cryptographique tel que le RSA qui permet sans risque ce type de partages à distance.

Alain est pas prêt à noircir à la main pixel par pixel l'image chiffrée C ! Aussi dispose-t-il des masques sous la forme de fichiers informatiques et il utilise un ordinateur pour produire les images chiffrées C . Béatrice, elle, n'aura besoin de rien d'autre que ses yeux pour le déchiffrement. L'opération de partage des masques réalisée par Alain et Béatrice permet d'échanger des secrets en parfaite sécurité par le

poste ou en utilisant des émissaires, même si ceux-ci peuvent être douteux.

Un masque à usage unique

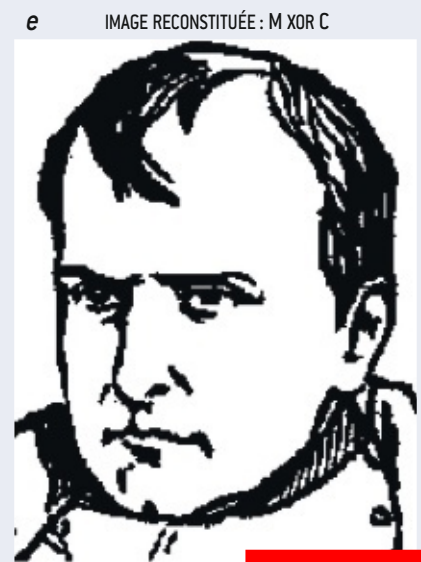
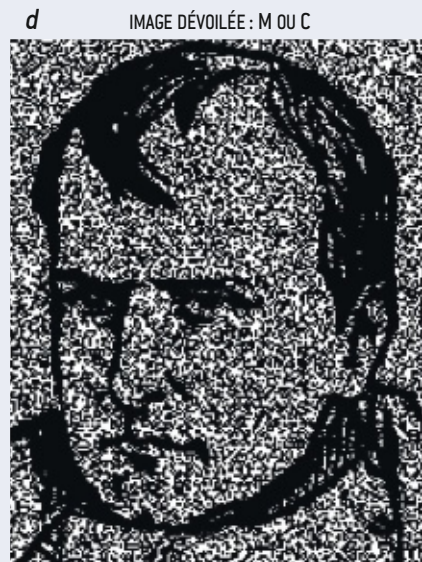
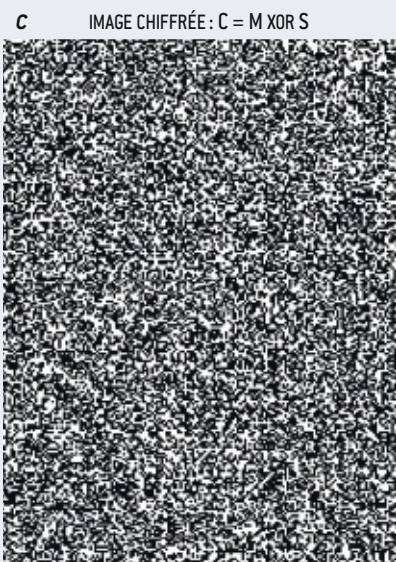
Lorsque Alain souhaite communiquer à Béatrice une image secrète S , il choisit l'un des masques M_i dont il dispose ; il utilise son ordinateur pour calculer l'image $C = M_i \text{ XOR } S$ qu'il poste ou fait remettre sous la forme d'un transparent à Béatrice en lui indiquant le numéro i du masque utilisé. Ce numéro i peut être inscrit sans risque sur le transparent, car celui qui ne dispose

pas des transparents $M_1, M_2, \dots, M_n$ ne peut rien faire de l'information i , pas plus qu'il ne peut tirer quoi que ce soit du transparent C . Alain peut aussi transmettre l'image chiffrée C en utilisant le réseau et demander à Béatrice d'imprimer le transparent C quand elle reçoit le fichier numérique.

Pour que Béatrice prenne connaissance de l'image secrète, elle superpose le transparent reçu C et le transparent du masque M_i dont elle dispose. Alain et Béatrice jetteront le masque M_i qu'il ne faudra plus jamais utiliser.

Pour que la méthode résiste aux attaques d'espions, il est essentiel que les images des masques $M_1, M_2, \dots, M_n$ soient aussi aléatoires que possible : il faut les produire avec de bons procédés de génération de suites aléatoires et ne surtout pas prendre pour masques des images représentant quelque chose. De plus, il ne faut jamais réutiliser un masque M_i : si vous le faites, plus aucune garantie de confidentialité ne pourra être assurée (voir l'encadré 2).

En respectant cette double consigne de sécurité, le procédé est sûr car ce système cryptographique est équivalent à la méthode du masque jetable (aussi dénommé *one-time pad* ou code de Vernam), dont

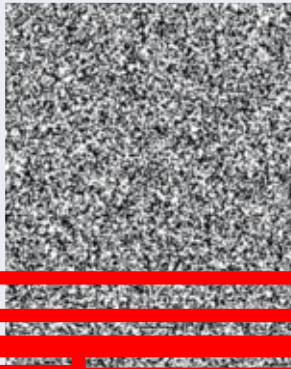


2. Jamais deux fois le même masque !

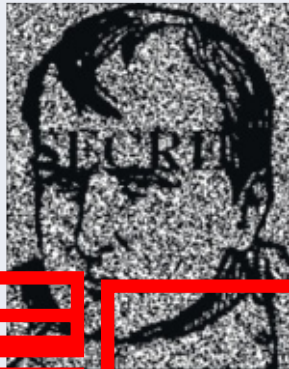
a IMAGE SECRÈTE : S'



b IMAGE CHIFFRÉE : $C' = M \text{ XOR } S'$



c IMAGE DÉVOILÉE : $C \text{ OU } C'$



d IMAGE RECONSTITUÉE : $C \text{ XOR } C'$



Si on utilise la méthode du masque jetable (voir l'encadré 1) pour créer des transparents chiffrés, il ne faut surtout pas utiliser deux fois le même masque. En voici la preuve.

Ici, en utilisant le masque M (encadré 1) pour chiffrer l'image secrète S' (a), on a créé une image où est caché le mot SECRET, en opérant un XOR avec le masque M ; $S' = \text{SECRET}$ (a), $C' = M \text{ XOR } S'$ (b). Un espion qui s'emparerait des deux messages

secrets (celui avec la tête de Napoléon, et celui contenant le mot SECRET) et superposés (c), l'espion obtiendrait l'image dévoilée $C \text{ OU } C'$ (d). En effet, $C \text{ XOR } C' = (M \text{ XOR } S) \text{ XOR } (M \text{ XOR } S') = S \text{ XOR } 0 \text{ XOR } S' = S \text{ XOR } S'$.

Utiliser un masque aléatoire une seule fois est une méthode inviolable, mais utiliser le même masque deux fois est une énorme bêtise.

Claude Shannon a démontré l'absolue inviolabilité en 1949.

La superposition des deux transparents M_i et C fait bien apparaître l'image S , mais sous une forme dégradée (bruitée), car le OU opéré instantanément par l'œil laisse un bruit qui remplace le blanc de l'image secrète initiale. Si, au lieu d'utiliser l'œil, Béatrice dispose d'un ordinateur, un déchiffrement parfait est possible. En effet, nous savons que pour un message quelconque A , on a $A \text{ XOR } A = 0$ et $0 \text{ XOR } A = A$ (vous pouvez le vérifier avec les valeurs blanches et noires, blanc = 0, noir = 1). Béatrice opère un XOR entre M_i et C qui redonne S , car :
 $M_i \text{ XOR } C = M_i \text{ XOR } (M_i \text{ XOR } S) = (M_i \text{ XOR } M_i) \text{ XOR } S = 0 \text{ XOR } S = S$.

Insistons bien sur le fait qu'une fois le masque M et l'image chiffrée C créés, aucun des deux transparents à lui seul n'a la moindre information sur l'image secrète S . C'est évident pour M , puisqu'il a été créé sans même qu'on sache quelle serait l'image S qu'on chiffrerait. Voici maintenant le raisonnement qui montre que connaître C sans connaître M ne permet pas d'avoir la moindre information sur S .

Un espion qui dispose de l'image C et sait qu'elle a été engendrée par la méthode du masque jetable sans connaître le masque peut essayer tous les masques possibles qui, *a priori*, ont la même probabilité d'avoir été utilisés pour créer C à partir de S .

L'espion se dit qu'en essayant les masques systématiquement, quand il arrivera au bon M_i , il verra apparaître un dessin différent d'un nuage aléatoire, ce qui lui indiquera qu'il est en train d'utiliser le bon masque M_i . Cependant, cette idée est illusoire : pour toute image S' autre que S , il existe un masque M' qui, quand on l'applique à l'image chiffrée C en faisant un XOR, donne S' (il s'agit du masque $M' = C \text{ XOR } S'$). En conséquence, en essayant systématiquement tous les masques possibles (ce qui par ailleurs n'est pas envisageable du fait de leur trop grand nombre), l'espion tombera sur une fausse solution S' avec la même probabilité que sur la véritable image secrète S . Cela étant vrai de n'importe quelle fausse solution S' , pour celui qui n'a en main que C , il n'existe aucun moyen de distinguer S de n'importe quelle autre image S' , et donc aucun moyen de

L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

reconnaitre que S est l'image qui a été cachée dans l'image chiffrée C .

La mise en œuvre de ce procédé est réellement facile. Pour réaliser les images de l'encadré 1, je n'ai utilisé aucun logiciel spécialisé : je me suis juste procuré des grilles aléatoires (en utilisant le logiciel *Golly*), puis j'ai réalisé les manipulations d'images avec un logiciel de dessin standard (*Graphic Converter* pour Macintosh).

Information préservée

Cette méthode de base de la cryptographie visuelle a un petit défaut. Un pixel sur deux est perdu dans l'image M OU C , car si les pixels noirs de S sont bien retrouvés noirs, les pixels blancs sont, une fois sur deux, transformés en noir. Cette image M , OU C est la seule que l'on voit si on ne

dispose pas d'ordinateur pour opérer un XOR (qui, ici, redonne chaque pixel exactement). Si l'image S est suffisamment redondante, par exemple un texte écrit en assez grosses lettres, cela n'est pas ennuyeux. Cependant, si l'on souhaite transmettre à une personne sans ordinateur une image dont chaque pixel est important, la méthode du masque jetable ne convient du tout. C'est sans doute pourquoi la méthode présentée par M. Naor et A. Shamir dans leur travail de 1994 est légèrement différente de la méthode de base.

En voici la description : chaque pixel de l'image à cacher est décomposé en deux demi-pixels ; de même pour les pixels des masques $M_1, M_2, M_3, \dots$. Pour effectuer ces opérations sur des demi-pixels, on peut les utiliser deux à deux, car chaque groupe de quatre pixels peut être

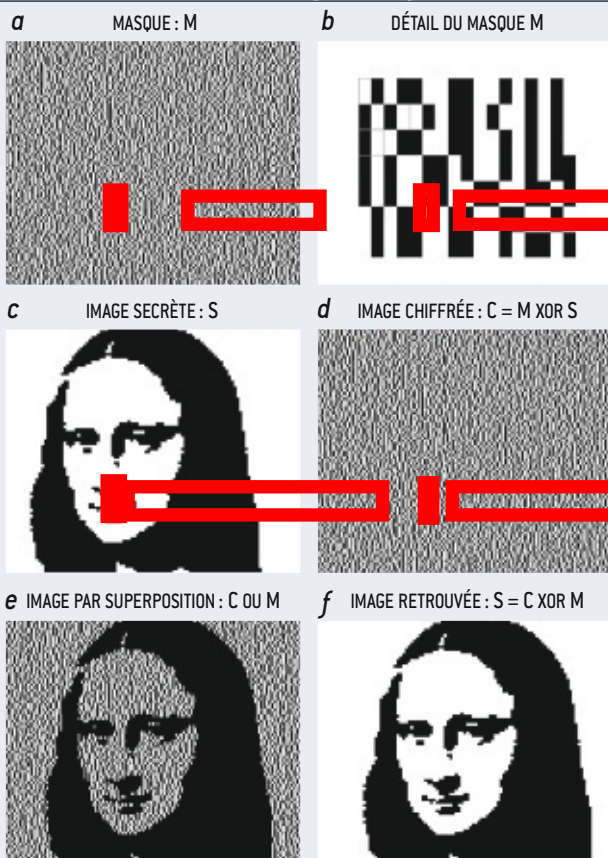
BIBLIOGRAPHIE

S. Cimato et C.-N. Yang, *Visual Cryptography and Secret Image Sharing*, CRC Press Inc., 2011.

Visual cryptography, *Wikipedia* (consulté en mars 2012) : http://en.wikipedia.org/wiki/Visual_cryptography

M. Naor et A. Shamir, *Visual Cryptography*, *EUROCRYPT 1994*, pp. 1-12 : www.wisdom.weizmann.ac.il/~naor/PUZZLES/visual_sol.html

3. Masques jetables sans perte d'information



La première méthode a un défaut : l'image reconstituée à l'œil par superposition du masque M et de l'image chiffrée S (qui correspond à un OU et non à un XOR) ne redonne pas tous les pixels blancs, mais en transforme la moitié en gris. En opérant sur des demi-pixels (un côté droit et un côté gauche), on évite cette perte d'information due à l'utilisation d'un OU plutôt que d'un XOR (opération que l'on ne sait pas faire !).

On part maintenant d'un masque M (a) constitué de pixels découpés en deux. Chaque pixel de M est maintenant composé de deux demi-pixels. Soit la moitié droite, soit la moitié gauche de chaque « gros pixel » sera noire, ce choix étant opéré aléatoirement (détail en b).

L'image chiffrée C (c) est obtenue en opérant un XOR entre l'image secrète S (dont on a doublé la taille) et le masque M , ce qui inverse les pixels du masque correspondant à des pixels noirs de S :

- si le pixel du masque est noir du côté droit et que le pixel correspondant de S est noir, le pixel de C sera blanc (à gauche) ;
- si le pixel de l'image secrète S est blanc, le pixel de l'image chiffrée sera le même que celui du masque.

La reconstitution de l'image secrète se fait comme auparavant. On obtient, en superposant les images M et C (c'est-à-dire en faisant M OU C), une image où les pixels noirs de S sont noirs, et où les pixels blancs de S sont remplacés par des pixels à moitié noirs (à droite ou à gauche aléatoirement). En opérant un XOR entre M et C (ce qui exige un ordinateur et non pas seulement deux transparents), on reconstitue exactement et avec le contraste initial l'image secrète S .

4. Éclatement d'une image en trois

Pour reconstruire les informations de l'image dans les deux méthodes décrites dans le texte de l'article, il faut disposer à la fois du masque et de l'image chiffrée. L'information de l'image a été éclatée en deux. On

peut faire mieux et éclater une image en trois morceaux (ou plus) dont aucun à lui seul n'indiquera rien à propos de l'image secrète S, et dont même la possession de deux des trois images ne permettra pas de tirer la moindre information sur S. Celui qui

posée de pixels 2×2 choisis parmi (BN, NB) ou (NB, BN). Les pixels de C ne seront pas choisis aléatoirement, mais de façon que :

- si le pixel correspondant de l'image secrète S est blanc, alors la superposition des pixels A, B et C sera composée de quatre sous-pixels blancs ;
- sinon, la superposition de A, B et C sera composée de quatre sous-pixels noirs.

On vérifie facilement qu'une telle transformation est toujours possible en considérant les quatre cas possibles pour un pixel de A et un pixel de B.

Montrons que ce procédé a bien les propriétés annoncées : connaître deux des trois images A, B et C

n'a pas les mêmes propriétés. Si M est l'image secrète S, M n'a pas les mêmes propriétés. Si M est l'image secrète S, M n'a pas les mêmes propriétés. Si M est l'image secrète S, M n'a pas les mêmes propriétés.

Voyons le procédé permettant l'éclatement parfait d'une image en trois images. On divise d'abord chaque pixel en quatre sous-pixels.

Si l'image secrète est de taille $n \times m$, on va créer trois images A, B et C, chacune de taille $2n \times 2m$, dont la superposition fera apparaître l'image secrète S. À la place des pixels blancs, la superposition de A, B et C montrera des pixels 2×2 comportant chacun un sous-pixel blanc et trois sous-pixels

des pixels 2×2 entièrement noirs. Malgré une importante perte de contraste, l'information sera donc complètement restituée par la superposition de A, B et C (et un masque).

L'image A (voir ci-dessous) sera composée de pixels 2×2 choisis aléatoirement (NB, NB) ou (BN, BN). L'image B sera composée de pixels 2×2 choisis aléatoirement parmi (BB, NN) ou (NN, BB). L'image C sera com-

posée de pixels 2×2 choisis parmi (BN, NB) ou (NB, BN). Les pixels de C ne seront pas choisis aléatoirement, mais de façon que :

– si le pixel correspondant de l'image secrète S est blanc, alors la superposition des pixels A, B et C sera composée de quatre sous-pixels blancs ;

– sinon, la superposition de A, B et C sera composée de quatre sous-pixels noirs. On vérifie facilement qu'une telle transformation est toujours possible en considérant les quatre cas possibles pour un pixel de A et un pixel de B. Montrons que ce procédé a bien les propriétés annoncées : connaître deux des trois images A, B et C ne donne rien concernant S (le raisonnement sera le même avec B et C). Considérons un pixel de S de coordonnées (x, y) . Les pixels correspondants de A et C recouvrent exactement trois des quatre sous-pixels (on le vérifie en considérant les quatre cas possibles). Selon que le pixel correspondant de B est noir en haut ou en bas, le pixel de la superposition A, B et C sera entièrement blanc ou entièrement noir. Ne possédant pas l'image B, celui qui dispose uniquement de A et C ne sait absolument rien de S.

On constate qu'en superposant deux des trois images A, B ou C, aucune information n'apparaît.

Pixels de A (NB,NB) ou (BN,BN)

Pixels de B (BB,NN) ou (NN, BB)

Pixels de C (BN,NB) ou (NB, BN)

IMAGE SECRÈTE S

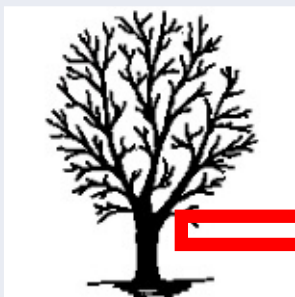


IMAGE A

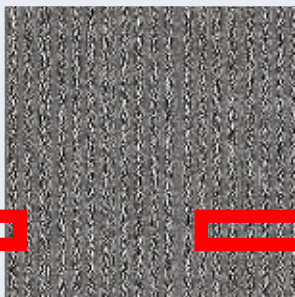


IMAGE B

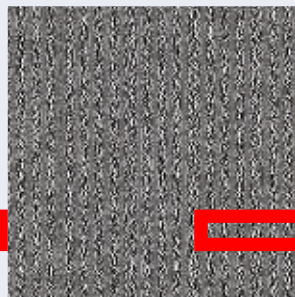


IMAGE C

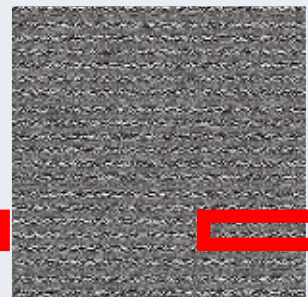


IMAGE (A OU B OU C)



IMAGE (A OU B)



IMAGE (B OU C)

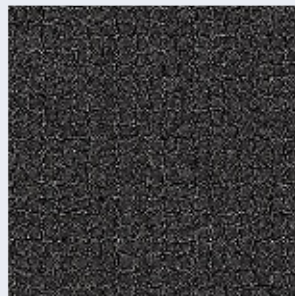
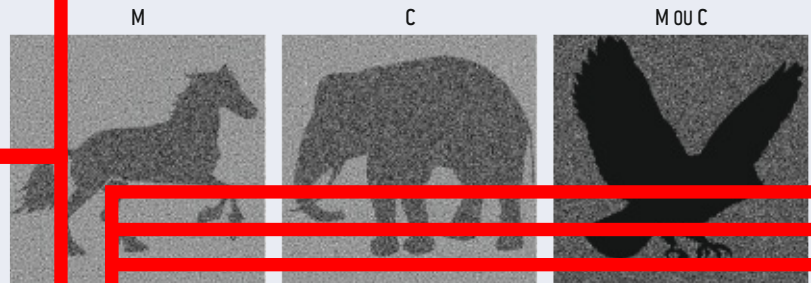


IMAGE (A OU C)



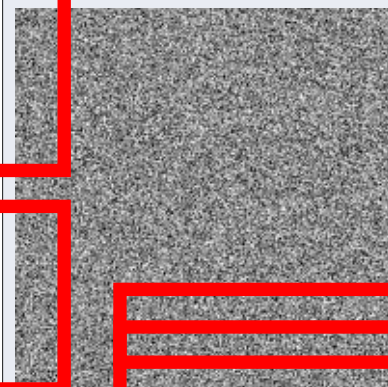
5. Masques imagés



Les méthodes décrites dans les encadrés 1, 2, 3 et 4 risquent d'attirer les soupçons si vous les utilisez, car on se doutera que les images grises « d'allure aléatoire » portent une information cachée. Elles ne sont donc pas adaptées à la cryptographie. Mais aussi bien que l'image chiffrée C ne sont plus gris, mais représentent des images ayant un intérêt en soi. La superposition des deux fait disparaître les deux images initiales et fait apparaître l'image secrète.

Nous n'indiquons pas le détail du procédé qu'un peu de réflexion vous fera imaginer. On remarquera que dans les deux images M et C , le dessin est obtenu avec deux types de gris : un gris 50% (un demi-pixel blanc, un demi-pixel noir) et un gris 75% (un pixel blanc, 3/4 de pixels noirs), alors que dans l'image reconstituée de S , il y a deux types de gris : un gris 75% et un gris composé de 100% de pixels noirs, qui permet de voir très clairement l'image secrète.

6. Énigme



Cette image contient un message caché (le prénom d'un mathématicien) par un procédé proche de ceux évoqués dans l'article. Le découvrir ne demande aucun programme particulier, juste un peu d'astuce. Comme pour les autres énigmes, une version numérique de cette image est : <http://www.lifl.fr/~delahaye/PLS416>.

La bonne réponse par courriel à l'adresse delahaye@lifl.fr gagnera un abonnement d'un an à *Pour la Science*.

connaissance de k images parmi $C_1, C_2, \dots, C_m$, quelles qu'elles soient, permet de reconstituer l'image S .

Autrement dit, une fois les informations de Séclates en $C_1, C_2, \dots, C_m$ et distribuées à m personnes différentes, si d'entre elles se mettent d'accord, elles peuvent retrouver S , mais si elles sont moins de k , elles n'en tireront strictement rien.

Une méthode d'éclatement d'une image secrète en trois transparents C_1, C_2, C_3 telle que deux parmi les trois transparents ne donnent absolument rien de S mais telle que la superposition des trois redonne S est décrite dans l'encadré 4 et présentée avec un exemple.

Le secret insoupçonnable

La méthode produit deux images, chacune d'apparence innocente U et V (par exemple un cheval et un éléphant). Cependant, la superposition de U et de V fait disparaître ce qu'il y avait sur U et V et fait apparaître une troisième image, celle secrète qu'on avait cachée (voir l'encadré 5).

Pour terminer, nous vous invitons à consulter l'encadré 6 qui propose une petite énigme cryptographique.

considéré comme un seul pixel et est maintenant séparable en deux (et même en quatre, ce qui sera utile pour d'autres procédés de chiffrement).

Les images $M_1, M_2, \dots, M_n$ sont constituées cette fois d'une grille aléatoire de demi-pixels, selon un tirage aléatoire aussi parfait que possible, chaque pixel de M_i est rempli par un demi-pixel droit noir ou un demi-pixel gauche noir, ou l'inverse.

L'image chiffrée C est elle aussi composée de demi-pixels. Le demi-pixel en position (x, y) de C sera identique à celui du masque M_i si le pixel de l'image secrète S en position (x, y) est blanc et sera le demi-pixel complémentaire de celui de M_i sinon. Comme précédemment, les images M_i ou l'image C sont d'un gris uniforme et aucune ne contient la moindre information sur S (voir l'encadré 3).

Lorsque l'on superposera C et M_i , là où il y a un pixel noir dans S , on aura un pixel noir, et là où il y a un pixel blanc, on aura un demi-pixel noir et un demi-pixel blanc (puisque ceux de C et de M_i auront été choisis identiques).

Cette fois, l'observation de la superposition opérée par l'œil redonne tous les pixels de S . La présence de demi-pixels là où il y avait des blancs a pour effet de changer le contraste (le blanc est devenu gris), mais aucune information n'est perdue dans l'image M_i ou C qui, cette fois, reconstitue parfaitement l'image secrète S , au contraste près (voir l'encadré 3).

Perfectionnements... et une énigme

L'idée de découper un pixel en sous-pixels permet d'autres miracles, dont voici deux exemples.

Éclatement d'une image en m morceaux

Pour tous entiers positifs k et m donnés, on peut définir un système de construction de transparents tel que l'image secrète S donnera m images chiffrées $C_1, C_2, \dots, C_m$ différentes et telles que la connaissance de moins de k d'entre elles ne permet pas de connaître quoi que ce soit de l'image secrète S , alors que la

ART & SCIENCE

Le cheval impossible

Dans un portrait équestre de Marie-Antoinette, le cheval de la reine est dans une posture invraisemblable qui ne correspond pas à la réalité.

En outre, certains traits anatomiques ont été délibérément exagérés.

Loïc MAILLON

Des peintures rupestres de la grotte de Lascaux jusqu'à de nombreux tableaux de Vasily Kandinsky, le cheval est un sujet de prédilection pour les peintres. Ainsi, même en se restreignant à la période dite classique, de la fin du XVI^e au début du XIX^e siècle, le nombre de portraits équestres est saisissant. Citons-en quelques-uns parmi les plus célèbres : *Saint Georges terrassant le dragon* (Raphaël, 1504) ; le *Portrait équestre du Comte-Duc d'Olivares* (Diego Velasquez, 1634) ; *Bonaparte franchissant le Grand-Saint-Bernard* (Jacques-Louis David, 1800) ; *Officier de chasseurs à cheval de la garde impériale chargeant* (Théodore Géricault, 1812)...

Sur la plupart de ces tableaux, et c'est particulièrement vrai de ceux peints aux XVII^e et XVIII^e siècles, toutes les représentations des chevaux sont fausses ! Pour l'expliquer, intéressons-nous au *Portrait équestre de la reine Marie-Antoinette*, peint par Louis-Auguste Brun en 1783 et conservé au château de Versailles (voir page ci-contre). Dans *Beautés intérieures*, publié à l'occasion de l'exposition *Beauté animale* au Grand Palais à Paris, l'œuvre est présentée par Christophe Degueurce, professeur d'anatomie à l'École vétérinaire d'Alfort.

La monture de la reine est montrée dans une sorte de cabré, où les membres sont symétriquement disposés, les deux postérieurs au sol et les deux antérieurs dans les airs. Le cheval s'élance au galop. Or cette allure est tout à fait impossible, asymétrique. À la fin du XIX^e siècle, les premières

photographies et expérimentations cinématographiques, notamment celles de Eadweard Muybridge (1830-1904), ont décrypté les enchaînements, trop rapides pour notre rétine, du galop. Il se décompose de la façon suivante : pose au sol d'un postérieur ; pose de l'autre postérieur et de l'antérieur diagonalement opposé ; pose de l'autre antérieur ; phase de suspension où aucun membre ne touche le sol. Dans cette dernière étape, les quatre membres sont rassemblés sous le corps et se déplacent

Les oreilles des chevaux étaient taillées de façon à augmenter le côté racé de l'animal.

extensivement dans une posture erronée que l'on retrouve dans certains tableaux, tel le *Derby de 1820* d'E. J. P. de Géricault, où les chevaux vont « ventre à terre ».

La position du cheval de Marie-Antoinette, cabré avec projection en avant des membres antérieurs, est typique des tableaux des XVII^e et XVIII^e siècles. L'autre attitude souvent représentée est un trot très relevé où les membres montent plus haut que naturellement.

Une autre transgression du peintre à la réalité concerne la conformation et les proportions du cheval : la tête et en particulier les oreilles sont très petites, les sabots sont un peu trop volumineux, l'œil est dilaté et,

enfin, les muscles sont particulièrement développés et saillants. Ces éléments sont un choix délibéré de l'artiste qui « transforme » l'animal pour souligner les caractères de beauté en vigueur à l'époque. Le cheval représenté est une construction, l'abstraction d'un idéal.

Aux XV^e et XVIII^e siècles, les chevaux sont organisés selon une hiérarchie sociale. L'aristocratie plébiscite des animaux importés d'Afrique du Nord ou de Turquie, tel le cheval arabe, ainsi que ceux d'Espagne, notamment le ginet, à petite tête, aux muscles saillants et au crin long et ondulé. C'est le type du cheval de Marie-Antoinette.

Les petites oreilles étaient signe de qualité, et celles des chevaux issus des campagnes françaises (Limousin, Normandie...) étaient souvent taillées afin de conférer aux animaux un air plus vif. Peintres et sculpteurs accentuaient cette petites taille pour la même raison — donner du caractère à la représentation —, soulignant les veines autour du nez, de l'œil et au niveau de l'éperon.

Deuxième observation étonnante, Marie-Antoinette en costume de chasse, est figurée dans une attitude résolument moderne. Sur le cheval harnaché aux couleurs des gardes nobles hongrois à la cour d'Autriche (son pays d'origine), elle ne monte pas en amazone, mais à la façon d'un homme.

Christophe Degueurce et H. Delbex, *Beautés intérieures. L'animal à corps ouvert*, RMN, 2012. Exposition *Beauté animale*, aux Galeries nationales du Grand Palais, du 21 mars au 16 juillet 2012.

Regards



EN IMAGES

Un géant endormi : le volcan du mont Paektu

La tranquillité des eaux du lac cache un regain d'activité volcanique. La menace d'une éruption a suscité une collaboration inhabituelle entre scientifiques chinois et coréens.

Sid Perkins

Regards

La sérénité des eaux du lac Céleste, l'une des grandes attractions touristiques du Nord-Ouest de l'Asie, est trompeuse. Ce lac emplit le cratère d'un des plus dangereux volcans de la région – au sommet du mont nommé Changbai par les Chinois et Paektu par les Coréens. Ce volcan qui culmine à 2 744 mètres, à la frontière entre la Chine et la Corée du Nord, a connu sa dernière éruption en 1903. Mais depuis quelques années, il montre des signes de réveil.

Le lac est la source de trois rivières qui, en cas d'éruption, pourraient canaliser des lahars, coulées dévastatrices mêlant

cendres brillantes, boue et eau, et ayant la consistance d'un ciment humide. Une éruption pourrait envoyer de telles coulées dévaler les pentes du volcan, ce qui menacerait des centaines de milliers de personnes.

Le séisme majeur et le tsunami qui ont frappé le Japon en mars 2011 ont incité les scientifiques de la région à agir. En août 2011, des équipes de géologues chinois, nord-coréens et sud-coréens ont, dans le cadre d'une inhabituelle collaboration, réalisé des études de terrain sur le volcan. En examinant les données

recueillies par le réseau de sismomètres installé en 1999 sur le côté chinois du mont et par les balises de géolocalisation pla-

cées sur les pentes du volcan, les chercheurs ont détecté une série de tremblements de terre superficiels ainsi qu'une élévation progressive du sommet depuis 2012. Les géologues l'attribuent à l'arrivée de magma dans la chambre située sous le volcan. Ce magma proviendrait des profondeurs du manteau terrestre, ce qui rendrait une éruption plus probable.

Selon le géologue Sung-hyo Yun, de l'Université nationale de Pusan en Corée du Sud, il existe des signes clairs d'une éruption prochaine. Les experts chinois la prévoient même pour 2014 ou 2015.

Sid PERKINS est journaliste scientifique à Crossville, dans le Tennessee (États-Unis).



IDÉES DE PHYSIQUE

Les dégagements du ballon rond

Lors d'un tir de dégagement par le gardien de but, le ballon de football ne suit pas une trajectoire parabolique et ne va pas très loin. Pourquoi ?

Jean-Michel COURTY et Edouard KIERLIK

Voici revenu le temps du championnat d'Europe de football, avec son cortège de passes décisives, de reprises de volée et de coups francs somptueux... Mais regardons un aspect moins spectaculaire du jeu : le dégagement du gardien de but. Si ce dernier parvient régulièrement à envoyer le ballon au-delà de la ligne du milieu de terrain, il n'atteint jamais le but adverse par un coup direct. Pratique sportive ou impossibilité physique ? Pour répondre à cette question, intéressons-nous à la trajectoire réelle du ballon et à sa portée maximale.

En vol, le ballon est soumis à deux forces : son poids et la force exercée par l'air. Le poids du ballon, pour une masse de 450 grammes, est de 4,4 newtons et dirigé vers le bas. La force aérodynamique est plus complexe.

Cette force est composée d'une force de traînée de sens opposé à la vitesse du ballon, et d'une force perpendiculaire, qui dépend de la rotation du ballon sur lui-même, des aspérités de sa surface, etc. On laissera ici de côté cette force latérale, qui explique les coups francs légendaires de Michel Platini ou de Roberto Carlos, mais qui a peu d'effets pour les coups de pied ordinaires.

Les forces en action : le poids et la traînée

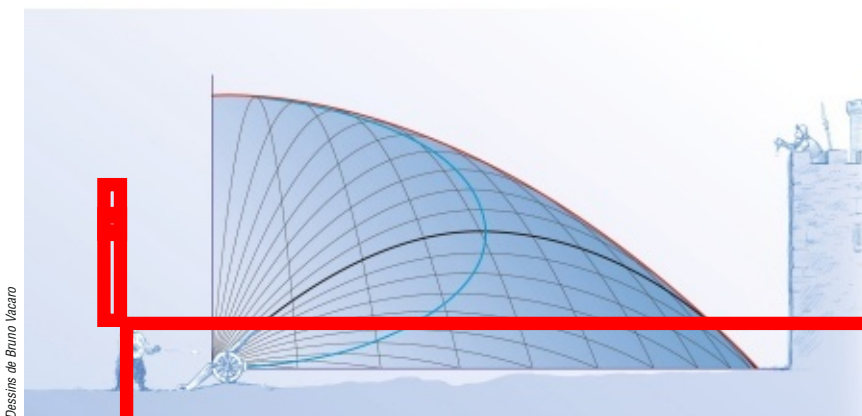
Par ailleurs, aux vitesses où vole le ballon (quelques mètres à dizaines de mètres par seconde), la traînée est proportionnelle au carré de la vitesse. Toutefois, en raison d'un changement de nature de la turbulence de l'air autour du projectile, le

coefficient de proportionnalité chute de plus d'un facteur trois quand la vitesse passe de 10 à 15 mètres par seconde. Ainsi, pour une vitesse de 10 mètres par seconde, la traînée vaut environ 1,1 newton, soit un quart du poids du ballon ; pour 20 mètres par seconde, elle a à peine augmenté à 1,5 newton. La traînée ne devient égale au poids que pour une vitesse d'un peu plus de 30 mètres par seconde.

Cette vitesse est inférieure aux records enregistrés (plus de 50 mètres par seconde !). Cependant, dans les conditions normales de jeu, la traînée est inférieure au poids. Négligeons-la dans un premier temps. Dans ce cas, le mouvement du ballon est régi par la seule action du poids. Il s'ensuit une vitesse horizontale constante et un mouvement vertical uniformément accéléré vers le bas. La trajectoire, comme l'avait déjà deviné Galilée, est alors une parabole (voir la figure 1).

La distance atteinte par le ballon, la portée, se détermine aisément. La montée du ballon dure jusqu'à ce que sa vitesse verticale s'annule ; le temps de montée est donc égal au rapport entre la vitesse verticale initiale et l'accélération de la pesanteur. Puisque la descente dure autant, le temps de vol est le double du temps de montée.

La distance parcourue est le produit du temps de vol par la vitesse horizontale. Par conséquent, la portée est le double du produit des vitesses initiales horizontale et verticale divisé par l'accélération de la pesanteur. Pour une vitesse initiale donnée (en norme), elle est maximale quand vitesse horizontale et vitesse verticale sont égales, c'est-à-dire quand le ballon est tiré avec un angle de 45 degrés.



Dessins de Bruno Vacaro

1. SI LA FORCE EXERCÉE PAR L'AIR EST NÉGLIGEABLE, un projectile en chute libre suit une trajectoire parabolique. Pour une vitesse initiale donnée, la parabole diffère selon l'angle de tir (traits noirs fins). La portée maximale est obtenue pour un tir à 45 degrés (trait épais). Les sommets des paraboles dessinent un morceau d'ellipse (en bleu). L'ensemble des trajectoires pour les différents angles de tir détermine une « parabole de sûreté » (en rouge) : tous les points situés au-delà de cette dernière sont hors d'atteinte du projectile.

Pour une vitesse initiale de 20 mètres par seconde, la portée dépasse 40 mètres ; elle atteint la longueur du terrain de football pour un peu plus de 30 mètres par seconde. Or cette portée théorique dépasse de beaucoup celle observée : elle montre, si besoin était, l'importance de prendre en compte l'effet de la traînée, à ces vitesses.

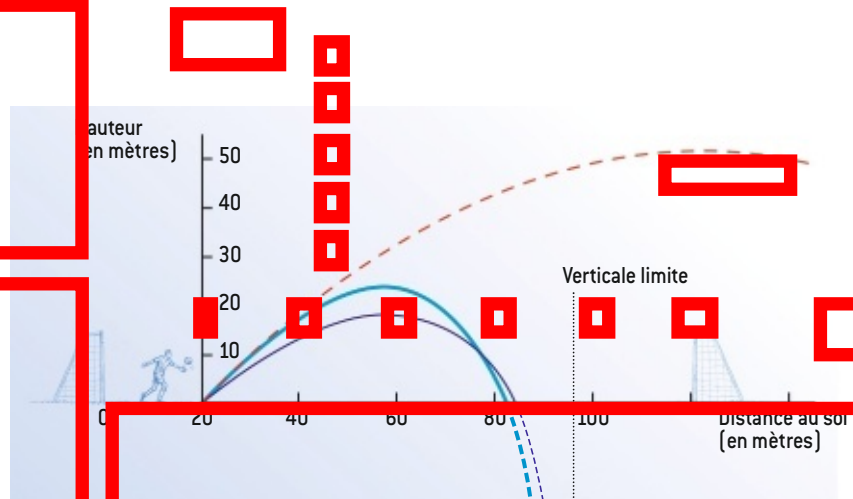
Des trajectoires caractéristiques

Malheureusement, on ne peut pas obtenir de formules explicites décrivant la trajectoire d'un projectile soumis à son poids et à un frottement proportionnel au carré de la vitesse. Il est bien sûr possible d'effectuer une étude numérique. Mais on peut aussi analyser des situations plus simples : le cas où la pesanteur est négligeable devant la traînée, puis le cas de la chute libre verticale.

Commençons par un projectile soumis uniquement à la traînée. On sait résoudre les équations du mouvement et obtenir l'expression de la vitesse en fonction du temps, mais il est plus intéressant de lier vitesse et distance parcourue. Le résultat est remarquable : la vitesse décroît exponentiellement avec la distance.

Cette décroissance s'effectue sur une longueur caractéristique, que l'on peut interpréter comme la longueur pour laquelle la masse d'air contenue dans le volume balayé par le ballon au cours de son mouvement est égale à la masse du ballon (à un coefficient numérique près). Cela traduit le fait que, en vol, le ballon rend turbulent l'air à travers lequel il se fraie un chemin. Aussi, comme la vitesse des turbulences est *a priori* proportionnelle à la vitesse du ballon, l'énergie cinétique déposée dans ces turbulences par unité de distance parcourue est proportionnelle à l'énergie cinétique du ballon. C'est l'origine de la décroissance exponentielle de la vitesse.

Pour un ballon de football, la longueur caractéristique de décroissance de la vitesse est justement de l'ordre de 100 mètres, à peu près la taille du terrain. On peut faire le même constat du ping-pong au golf, en passant par le basket-ball, le volley-ball ou le



2. QUAND LE GARDIEN DE BUT EFFECTUE UN TIR DE DÉGAGEMENT, il n'atteint jamais le but adverse. La parabole théorique (en pointillés rouges) le permettrait facilement. Mais la trajectoire réelle (en bleu clair) est très différente en raison de la traînée aérodynamique. Elle se rapproche d'une chute verticale dans sa dernière partie. De plus, la portée maximale, très inférieure à la portée de la parabole théorique, correspond à un tir à 30 degrés environ (en bleu foncé), et non à 45 degrés.

base-ball : la taille du terrain de jeu correspond à la distance caractéristique de freinage du ballon utilisée.

Examinons maintenant le cas de la chute libre verticale. Lâchons un objet d'une grande hauteur : il accélère et la traînée augmente jusqu'à atteindre une valeur qui compense exactement le poids. L'objet garde alors une vitesse constante pour la suite de son mouvement. Les 30 mètres par seconde mentionnés plus haut pour le ballon de football correspondent donc à sa vitesse limite de chute. Mais que se passe-t-il si nous lançons le ballon vers le bas à une vitesse supérieure, la traînée dépasserait le poids et le ballon ralentirait jusqu'à sa vitesse limite.

Comment tirer parti de ces deux situations – poids négligeable par rapport à la traînée ou chute libre – pour comprendre les trajectoires réelles du ballon ? Imaginons d'abord que la trajectoire ne soit pas limitée au sol et que le ballon puisse poursuivre sa chute. À cause de la traînée, la vitesse horizontale diminue progressivement, tandis que la vitesse verticale tend vers une valeur limite.

La conséquence est que la trajectoire s'achève en nécessairement comme une chute libre le long d'une droite verticale, dont la distance au point de départ du ballon sera du même ordre que la longueur caractéristique de ralentissement mentionnée plus haut. Autrement dit, on peut considérer cette

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIENDIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : hyperlographem.fr

BIBLIOGRAPHIE

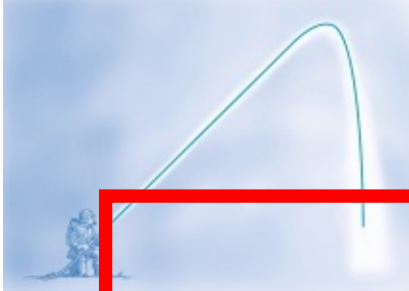
G. Dupeux et al., *Le football et ses trajectoires*, *Reflète de la Physique*, n° 28, pp. 10-14, mars 2012.

G. Dupeux et al., *The spinning ball spiral*, *New Journal of Physics*, vol. 12, 093004, 2010.

J.-M. Courty et É. Kiendik, *L'art du ballon bien brosse*, *Pour la Science*, n° 320, pp. 98-99, juin 2004 [en accès libre sur www.pourlascience.fr]

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et É. Kiendik sur www.pourlascience.fr

Regards



3. LE PUISANT JET D'UNE LANCE à incendie ne suit pas une trajectoire parabolique. Dans la première partie de la trajectoire (vitesse du jet très élevée), le poids des particules d'eau est négligeable par rapport à la traînée aérodynamique, d'où une trajectoire presque rectiligne. Près du sommet, où la vitesse est faible, la trajectoire est parabolique (traînée négligeable par rapport au poids), puis elle tend vers une verticale. Les fusées de feux d'artifice ou les étincelles produites lors d'une soudure à l'arc dessinent des trajectoires du même type.

distance comme la portée maximale du dégagement.

En augmentant la vitesse, on peut certes accroître cette portée, mais, comme la vitesse diminue exponentiellement avec la distance à vitesse élevée, l'accroissement est faible. En pratique, la forme de la trajectoire dépend du rapport entre la vitesse initiale et la vitesse limite de chute libre. Si ce rapport est petit, la traînée est négligeable devant le poids ; la trajectoire est alors proche d'une parabole.

En revanche, si la vitesse initiale est supérieure à la vitesse limite, la traînée va dominer : la trajectoire débute de façon presque rectiligne, puis, une fois que le projectile a suffisamment ralenti, elle se poursuit sur une partie verticale. On observe ce type de trajectoire, révélée dès la Renaissance par l'Italien Tartaglia dans

ses travaux sur la balistique, dans de nombreuses autres situations, par exemple les jets d'eau sous haute pression des lances d'incendie (voir la figure 3), les projections de particules incandescentes lors de soudures à l'arc ou les fusées éclairantes des feux d'artifice.

Dans le cas des dégagements au football, la vitesse du ballon est plutôt comparable à la vitesse limite : on est donc dans une situation intermédiaire. La trajectoire n'est plus vraiment une parabole, mais elle n'est pas encore totalement déformée (voir la figure 2). En raison du frottement, la vitesse horizontale diminue vite. Il n'est alors plus nécessaire d'avoir une longue durée de vol ; il faut plutôt profiter de la phase initiale où cette vitesse est élevée. C'est pourquoi l'angle optimal de tir est nettement inférieur à 45 degrés ; il est de l'ordre de 30 degrés.

ESPECES
Revue d'histoire naturelle
N°13
Mars 2013
Paléontologie
À l'origine des oiseaux et des mammifères

Une nouvelle Espèce en kiosque
Revue d'histoire naturelle

Makis de Mayotte
Les protéger - dans les règles

Toutes les sciences de la vie et de la terre

En quête d'espèces
À quoi servent les expéditions scientifiques ?

Reportages
Une dent au secours des campagnols

100 % associatif
100 % inédit

Especes est une revue dédiée aux sciences de la vie et de la terre qui donne la parole aux acteurs de la recherche au travers d'articles de fond, de reportages et d'actualités.

www.facebook.com/revue.Especies

www.especies.org

http://especies-revue.blogspot.fr



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

Un événement **CNRS** et **Université de Lorraine**

Festival du Film de Chercheur

du 6 au 10 juin 2012

PARC DE LA PÉPINIÈRE / **NANCY**

[À DEUX PAS DE LA PLACE STANISLAS]

entrée gratuite

De la Mongolie au Mexique et même en apesanteur...
du 2^e siècle avant J-C à nos jours... de la robotique à
la musicologie en passant par l'astronomie... 25 films
projetés, accompagnés par les chercheurs qui les ont
inspirés, vous transportent à travers les continents,
les siècles et les thématiques.

Découvrez une recherche proche de vous et des
enjeux de notre vie quotidienne.

LE FESTIVAL, C'EST AUSSI :

DES SOIRÉES

Echanges et débats autour de 4 thèmes :
"et le monde devint informatique",
"le mystère de la tête d'Henri IV",
"question de peau, question de couleur"
et "coup de jeûne !"

DES SPECTACLES ET ANIMATIONS SCIENTIFIQUES

Drôles et décalés pour toute la famille
le mercredi et tout au long du week-end.

ET AUSSI...

Le concours des chercheurs en herbe, les
rencontres professionnelles et des rendez-
vous tout au long de l'année.

www.filmdechercheur.eu



Festival du film
de chercheur



SCIENCE
Semaine



Inserm



ville de
Nancy

GrandNancy

Musées & Monuments

Le Réseau
Lorraine

CRDP



SCIENCE & GASTRONOMIE

Le poison est dans le pré

Certaines plantes consommées contiennent des substances toxiques... ainsi que leurs antidotes !

Hervé THIS

Peut-on raisonnablement manger du poulet à l'estragon ou des salades de tomates agrémentées de basilic ? La question semble étrange, mais elle cesse de l'être quand on sait que l'essentiel du goût de l'estragon ou du basilic est dû à un composé nommé estragole, qui est cancérigène et génotoxique. Ce qui pose à la réglementation la question : les cuisiniers employant ces herbes seraient-ils de dangereux empoisonneurs, qu'il faudrait mettre hors d'état de nuire ?

Par chance, contrairement à ce que croient des citoyens mal informés, nos instances sanitaires prennent très à cœur les questions toxicologiques, et tous les aspects de notre alimentation sont sévèrement encadrés. Mieux, à l'heure où les États ont décidé (avec le programme REACH) de réexaminer la toxicité éventuelle des composés utilisés par les industries, les toxicologues en viennent à reprendre, notamment dans le champ alimentaire, des travaux anciens. Les études qui sont alors commanditées conduisent parfois à des découvertes.

En particulier, une étude de la toxicologie de l'estragole et aussi de l'estragon, sous diverses formes, révèle que ce composé pur est bien dangereux, il ne l'est pas dans la plante, ni quand le composé pur est associé à cette dernière. Pourquoi ?

Le terme estragole est un nom familier pour un composé connu des chimistes sous le nom de méthylchavicol, et qui s'apparente moléculairement à l'eugénol, abondant dans le clou de girofle et le basilic, qui fait le pestis, deux composés qui ne

sont ni mutagènes ni carcinogènes. En revanche, l'estragole se révèle génotoxique quand on l'applique à des hépatocytes de rat en culture, ou à des rats vivants. Ce fait a été récemment confirmé en 2010 par une équipe de toxicologues de Lille et de Brest (Fabrice Nessler, Dominique Parent-Massin et Daniel Marzin).

Toutefois le travail expérimental a également montré que de l'estragon congelé est moins toxique que le méthylchavicol administré aux doses contenues dans le tissu végétal congelé, et que l'estragon séché n'a pas de toxicité *in vitro* et *in vivo*, alors qu'il contient de faibles quantités d'estragole. Mieux, les tests *in vitro* montrent que l'estragon congelé ou l'estragon séché réduisent l'effet de l'estragole administré !

Pourquoi ? On pourrait imaginer que l'estragon entier ne libérerait pas l'estragole : un poison que nous avalerions dans une boîte hermétiquement fermée ne serait pas un poison. L'argument est toutefois réfuté par les expériences, qui font plutôt soupçonner des propriétés antimutagènes des feuilles d'estragon (lesquelles, ne l'oublions pas, sont des cocktails de très nombreux composés) ou l'adsorption de l'estragole sur les tissus végétaux, ce qui bloquerait l'action du composé.

Comment relier les études de laboratoire, où les doses testées sont connues, à ce qui se passe à table ? Les études de consommation montrent que si l'on considère de bons consommateurs adultes français (les Français consomment plus d'estragon que les autres Européens), et qu'on extrapole la quantité consommée à la vie entière, on détermine que la dose à

laquelle une toxicité apparaîtrait est environ 15 000 fois supérieure à la quantité consommée ! Pour les enfants, qui ont une masse corporelle inférieure, le rapport se réduirait à 8 200... mais quel parent gaverait son enfant d'estragon ?

Certes l'être humain n'est pas un rat et les études sur de si petits animaux ne permettent pas de considérer l'administration de fortes doses ; mais l'ensemble des études, celle qui vient d'être publiée et d'autres effectuées depuis le début des années 2000, montrent que, au total, la consommation d'estragon ne présente aucun risque pour l'être humain.

En revanche, il serait peut-être suicidaire de boire des infusions d'estragon dans l'enfance. L'estragole, très soluble dans l'éthanol des eaux-de-vie, pourrait être concentrée au-delà de limites raisonnables. Il nous terminons sur une note positive : ne pouvons-nous aussi imaginer que d'autres feuilles que celles d'estragon séchées ou lyophilisées puissent, ajoutées à ces mets, réduire ou annuler des effets toxiques de composés présents par ailleurs ? C'est la chimie qui permet de comprendre de tels effets !



Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de l'Institut National de la Recherche Scientifique.

Science & Culture Animée de l'Académie des sciences



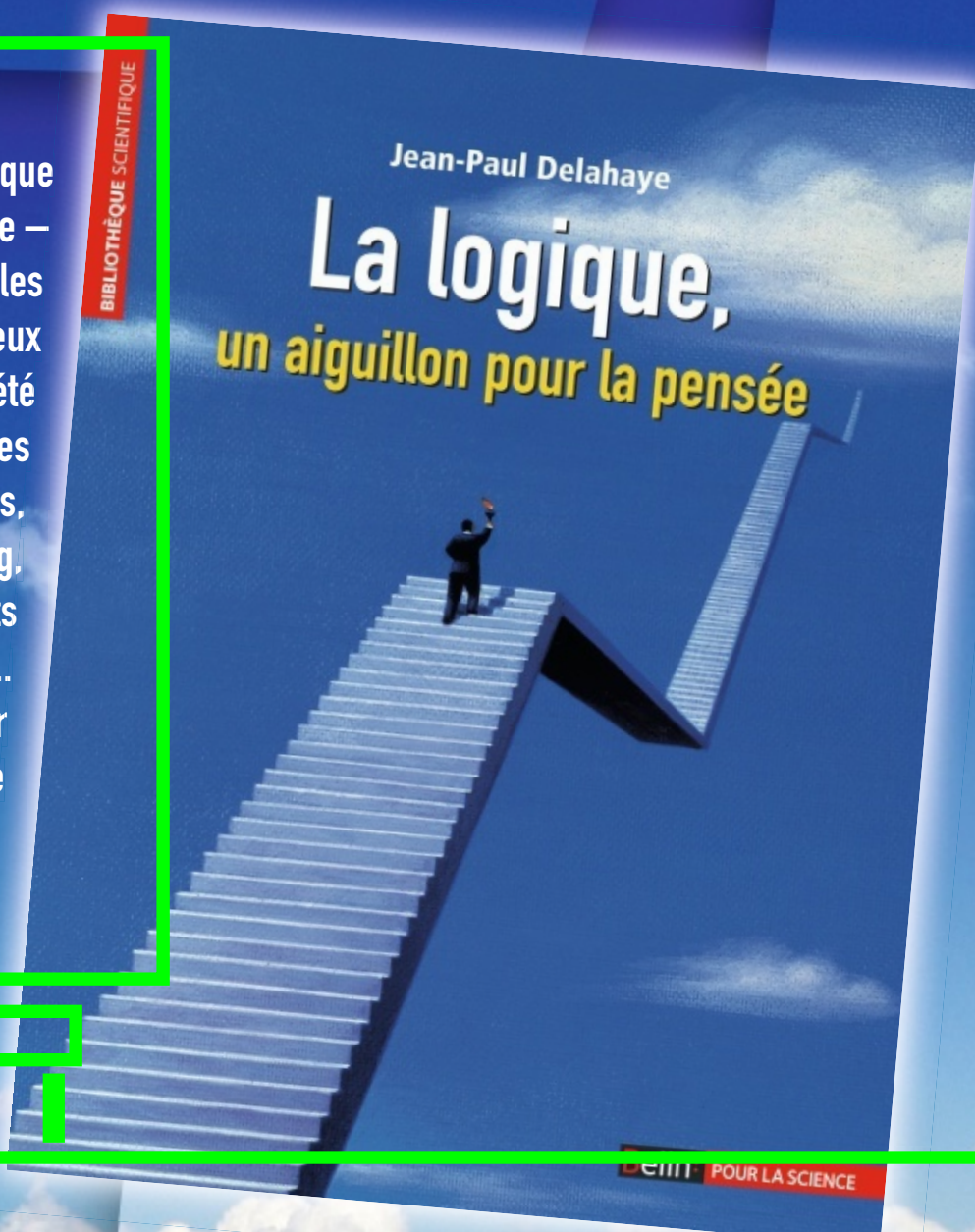
Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

La logique
— prise au sens large —
a connu d'incroyables
progrès depuis deux
siècles : l'infinie variété
des infinis, les étranges
hyperensembles,
l'indécidabilité de Turing,
les déconcertants
paradoxes probabilistes...
Cet ouvrage sur
la logique moderne
des sciences intéressera
autant mathématiciens
que philosophes et curieux,
intrigués par le monde
abstrait des raisonnements.

Éditions Belin/Pour la Science 2012
200 pages — 27 euros — ISBN 978-2-8426-5115-8



Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr/librairie

→ SCIENCE ET SOCIÉTÉ

Un biologiste contre le nucléaire

Jean Rostand

Berg International, 2012
(206 pages, 19 euros).



Cet ouvrage présente les textes du biologiste Jean Rostand concernant son combat contre l'armement nucléaire, publiés entre 1962 et 1972. Si Rostand, membre fondateur du Mouvement contre l'armement atomique, essentiellement dirigé son action contre le nucléaire militaire, c'est qu'à son époque, certains États pratiquaient régulièrement et au grand jour des essais pour tester l'efficacité de leurs bombes. À cette époque, le nucléaire civil n'avait pas encore donné toute la mesure des dangers qu'il représentait pour les populations. Aujourd'hui, par sa présence médiatique liée à l'ampleur des catastrophes de Tchernobyl et de Fukushima, le nucléaire civil a tendance à faire oublier l'impressionnant stockage mondial d'armes nucléaires. Le bon ménage du nucléaire civil et du nucléaire militaire a de quoi inquiéter dans la mesure où ils pèsent sur le devenir de l'humanité et de la planète.

C'est dans le cadre de l'Institut de la vie, une institution internationale fondée par Rostand en 1960 pour protéger la vie, qu'il dévoile ses préoccupations envers la «santé génétique de l'espèce», celle de l'*Homo sapiens* qui se trouve malgré lui soumis aux radiations délétères de l'atome de guerre à la suite des explosions à répétition, mais aussi à celles produites par les déchets radioactifs: «Les explosions nucléaires font pas que tuer; elles préparent de la mauvaise vie; elles créent une contamination des gènes défectueux, qui vont

proliférer et définir. Non seulement c'est dans l'avenir, mais crime vivant, continué, qui s'entretient de soi-même» (1967). C'est dans les années 1970 que Rostand émet des doutes quant à l'innocuité de «l'atome de Paix»: «La moindre imperfection [dans l'installation d'une centrale nucléaire] peut avoir de redoutables conséquences pour la santé génétique des populations, conséquences d'autant plus redoutables qu'elles seraient longtemps invisibles» (1972).

Toutefois, dans ses *Inquiétudes d'un biologiste* (1967), Rostand reconnaît les limites de son combat, face aux arguments politiques, industriels et financiers: «Protester contre les armes atomiques, c'est tout à la fois inutile et indispensable.» Mais que la menace est là, et la démonter est un devoir moral de l'homme envers l'homme. Il y a dans ces pages de Rostand de la science, du style, une prise de conscience citoyenne et un profond humanisme.

À cette époque, Rostand fait aussi porter sa conscience que la «nature est en péril» et, à travers elle, «l'homme lui-même». Ainsi l'homme se trouve-t-il face à son destin; mais quelle confiance pouvons-nous lui accorder? À cette interrogation, Alain Dubois répond dans un texte de 94 pages présenté à la fin du volume: «Les

textes de Jean Rostand n'ont jamais été au bout d'actualité. Si, malgré Hiroshima, Nagasaki, Tchernobyl et Fukushima, notre pays persiste dans la voie mortifère de l'armement et de l'énergie nucléaires, n'aura-t-il pas enfin que, à l'instar du «solitaire de Ville-d'Avray», les citoyens s'emparent enfin de cette question et fassent entendre leur voix?» À lire ou relire.

→ Jean-Louis Fischer

→ HISTOIRE DES TECHNIQUES

L'apocalypse joyeuse

Jean-Baptiste Fressoz

Seuil, 2012
(320 pages, 23 euros).

Est-ce que les premiers chemins de fer ont engendrés des craintes irrationnelles et que, en 1835, l'Académie de médecine de Lyon s'est alarmée des atteintes à la rétine et des troubles de la respiration qu'ils provoquaient? Non, selon J.-B. Fressoz: il s'agit là d'un mythe datant de la fin du XIX^e siècle. Il n'existait même pas d'académie de médecine à Lyon! Les chemins de fer ont inquiété, certes, mais ce fut à la suite d'accidents.

L'inquiétude, comme le savoir, se fait technique. Notre société, qui se plaint d'avoir sur elle-même un recul réflexif que les précédents n'ont pas eu, appuie cette conviction sur des images fausses. J.-B. Fressoz restitue aux sociétés passées leur intelligence et leur complexité, et mouche quelque peu la superbe de la nôtre. Nous prétendons édicter des normes pour encadrer les nouvelles technologies. En fait, à coups de passages en force, «la

technique a façonné sa régulation bien plus que l'inverse».

Ainsi, l'environnement. L'ancien Régime n'y était pas indifférent. Il confiait à la police, qui enquêtait lorsqu'un problème se présentait. Avec l'essor du libéralisme, au XIX^e siècle, l'environnement cesse d'être affaire de police et devient pour devenir objet marchand. Moyennant compensations financières, on a pu polluer. Au nom de la prospérité nationale, le pouvoir a imposé des normes qui allaient contre l'intérêt des citoyens, mais qui permettaient à ses amis d'installer des usines polluantes – et lucratives.

Abondant en données factuelles, l'ouvrage de J.-B. Fressoz juxtapose des monographies sur la façon dont se sont répandus en France et en Angleterre, aux XVIII^e et XIX^e siècles, l'inoculation, la vaccination. Les chemins de fer, les usines à gaz... Les débats pour ou contre l'implantation d'usines à gaz au centre des villes ne furent pas sans ressembler à ceux que nous connaissons sur le nucléaire. Les opposants prévoyaient toutes sortes d'accidents. Les partisans rejetaient ces hypothèses comme «chimériques». Finalement, il y eut des accidents, mais leurs causes furent autres que ce qu'avaient imaginé



les opposants. « La technique et ses circonstances, c'est-à-dire la complexité du monde, déjoueront systématiquement tous les pronostics. Le seul vainqueur de la controverse fut l'imprévisible. »

Sans le dire explicitement, l'ouvrage suggère que notre époque va plus loin que les autres dans la manipulation des esprits. L'emploi du mot « apocalypse » dans le titre révèle l'inquiétude qu'inspire à l'auteur la désinhibition face aux techniques qui s'est généralisée aux XIX^e et XX^e siècles.

merveilleux à leurs petits-enfants, et ce avec des ingrédients de tous les jours. Qui tout d'un coup se revêtent de la toge de la connaissance. Les textes ne se veulent pas savants, quoiqu'ils le soient, mais paraissent si simples et aller de soi avec ce ton de conteur à la veillée.

Ouvrez ce livre auprès d'un feu de bois (la combustion), avec une tasse de café (infusé, puis décaféiné ou percolé) en grignotant un gâteau, en confiné grâce au dioxyde de carbone produit par les petites levures actives, que vous aurez pris dans un plat en pyrex

→ CHIMIE

Vous avez dit chimie

Yann Verchier, Nicolas Gerber
Dunod, 2012, 164 pages, 14,90 euros.

L'année internationale de la chimie a été l'occasion de présenter des projets scientifiques innovants à destination d'un public de tout âge et de toute formation. C'est ainsi que l'on a vu fleurir des expositions et des pièces de théâtre, à côté de colloques savants et de conférences pour le grand public. L'exposition *Vous avez dit chimie ?* de la Cité des sciences à Paris, aujourd'hui terminée, était de celles-là. Ludique et interactive, elle présentait de façon simple la chimie du quotidien, montrant à quel point tout ce qui nous entoure est chimie. Le présent ouvrage prolonge cette exposition.

Le ton est conservé et, sous la forme de petits chapitres illustrés de dessins humoristiques, la chimie de la cuisine, de la salle de bain ou du salon fait concurrence au jargon chimique. Les adolescents curieux y trouveront de quoi expérimenter, les grands-parents de quoi faire découvrir des



posé sur une nappe en viscose recouvrant la table en plexiglas. Jetez un œil de temps en temps sur l'écran plasma. Éclairez-vous par la mise en route d'un déplacement de particules chargées... Tout est chimie ! Et vous ne pouvez pas vous en passer les mains : le savon est le produit d'une réaction chimique qui vous plaît !

Les apprentis chimistes n'auront de cesse de reproduire les expériences décrites. Les lycéens qui la chimie brute trouveront là un excellent antidote, qui la leur rendra tout à fait absorbable.

Ce petit livre d'histoire de la chimie prétention et au savoir éclairé ravira petits, moyens et grands.

→ **Danielle Fauque**

CHDSO, Université Paris-Sud

→ ÉTHIQUE

Élever et tuer des animaux

Sébastien Mouret
PUF, 2012, 208 pages, 23 euros.

Les simulations sont largement fondées sur l'exploitation de l'animal et la consommation de sa chair. Or, à l'heure où la science montre que les bases biologiques de la douleur, voire de l'activité cérébrale, sont communes à l'homme et à ses plus proches parents animaux, comment gérer moralement de tels comportements ancestraux ? Divers mouvements proposent d'améliorer le bien-être des animaux, surtout des plus performants sur le plan intellectuel que sont les vertébrés. On peut les diviser en mouvements « radicaux », qui visent à promouvoir une alimentation végétarienne, et mouvements plus « modérés », qui visent à améliorer le bien-être animal sans nécessairement renoncer à l'alimentation carnée. C'est à ce second groupe qu'appartient le sociologue Sébastien Mouret.

Il s'inscrit donc dans la lignée de penseurs tels que Dominique Lestel ou Jocelyne Porcher, qui considèrent que le végétarisme n'est pas une attitude naturelle de l'esprit humaine et que, tout en continuant à tuer et à manger des animaux, l'homme peut cependant trouver avec eux un mode de « vivre-ensemble » harmonieux.

« Dans cette discussion, nous dit l'auteur, les positions éthiques des principales personnes concernées, à savoir les éleveurs et les salariés, appellent une attention particulière. » Et ce travail descriptif « qui est le rôle d'un sociologue » vise surtout à définir un état des lieux, sans lequel toute

Brève

SINGIERIE

Denis Petit et Humphrey Vidal
Casterman, 2012, 136 pages, 20 euros.

Un homme se suicide par overdose... Il ne meurt pas, mais devient singier. Comment un tel être mutant sera-t-il accueilli dans un monde où la science aurait perdu son autonomie, écrasée par un créationnisme tout-puissant ? Un conte décapant sur l'importance de l'indépendance scientifique.

VINGT ANS DE MA VIE, SIMPLE VÉRITÉ

Henri Poincaré
Germann, 2012, 350 pages, 29 euros.

Henri Poincaré (1856-1919) était lauréat du prix de mathématiques Henri Poincaré. Ses souvenirs de jeunesse, écrits en 1902-1903, ne réservent pas un rôle central à Henri, mais dépeignent l'atmosphère dans laquelle celui-ci a grandi : une famille plutôt conformiste. Avec le traumatisme de la guerre de 1870, de la défaite et de l'occupation qui a suivi,

LES MATHÉMATIQUES ÉCLAIRÉES PAR L'HISTOIRE

Évelyne Babin (dir.)
Vuibert-ADAP, 2012, 208 pages, 29 euros.

Proportionnalité, règle de trois, opérations de découpage d'aires et de volumes, loi normale... Enseignants et historiens des sciences, les auteurs invitent à revisiter neuf problèmes mathématiques à la lumière de leur contexte. Cet ouvrage destiné aux enseignants intéressera tous les férus de mathématiques.

Frères



PETITES EXPÉRIENCES

EXTRACTION
Richard Wiseman
Dunod, 2012
(250 pages, 17,50 euros).

Vous voyez ce canard page 78 ? Eh bien, c'est un lapin, découvrirez-vous en lisant ce livre. Notre cerveau nous abuse, il change la réalité que nous percevons. Les illusionnistes le savent bien. Multipliant les exemples, l'auteur montre comment notre cerveau, le plus grand manipulateur qu'il y ait, se trompe souvent, et nous invite à nous servir des « superpouvoirs » qu'il nous confère... pour faire le bien, naturellement.

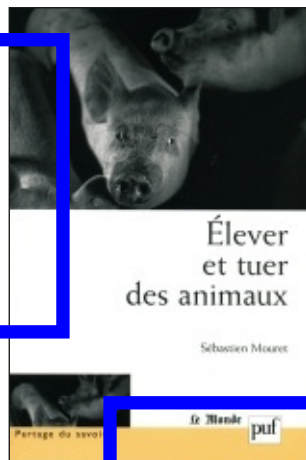
100 OISEAUX DES JARDINS

Frédéric Julliot
Delachaux & Niestlé, 2012
(192 pages, 9,50 euros).

C'est le printemps. Profitons-en pour découvrir quelques dinosaures à plumes. Issu du programme de science participative lancé par le Muséum de Paris, cet ouvrage présente en photos et en aquarelles non seulement leurs comportements, rattrapés de plumage, mais aussi les moyens de mettre à l'aise dans nos jardins 50 espèces d'oiseaux fréquentes et 50 peu fréquentes.



prise de décision morale devient arbitraire. Or que nous enseignent les lieux ? Avec l'industrialisation de l'élevage, particulièrement dans l'industrie porcine, on assiste à une « banalisation » de la violence envers les animaux : « le modèle dominant, l'organisation du travail altère profondément le sens moral ». La recherche du bonheur des animaux [...] cède à l'instauration d'un principe marchand », en même temps qu'à une « déshumanisation des éleveurs et des salariés ». L'impact éthique négatif touche à la fois les animaux des chaînes industrielles et les humains qui y travaillent.



C'est donc bien à des conséquences morales que conduit cette enquête impartiale. Des conséquences morales qui se veulent loin de l'utopie d'une société végétarienne mais qui, au nom de la « gratitude des humains à l'égard des animaux », visent au don d'une vie bonne pour les animaux, en lien avec une vie bonne pour les éleveurs, dans un rapport coexistant, pour tous et en lien étroit, à la vie comme la mort.

→ Georges Chapouthier

Centre Émotion, USR 3246, CNRS-UDMC-Dijon-Salonnaire, Dijon

→ ETHNOLOGIE

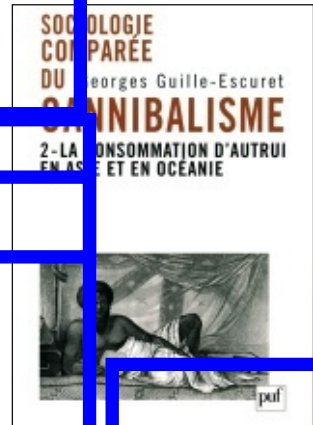
Sociologie comparée du cannibalisme

Georges Guille-Escuret
PUF, 2012
(410 pages, 32 euros).

Dans le premier volume de sa vaste enquête historique et comparative cannibales, G. Guille-Escuret, ethnologue et biologiste, s'est intéressé à l'Afrique, en examinant l'apparition récente de l'écocannibalisme (le fait de manger tout ou partie de l'ennemi) à la suite des troubles provoqués par la traite négrière. Dans ce nouvel ouvrage, l'auteur poursuit son exploration exhaustive de la littérature disponible sur la question, via l'analyse systématique des *Human Relations Area Files*, la base de données ethnographiques de l'Université Yale. Le tableau apparaît ici moins homogène.

En Asie et en Océanie, la consommation d'autrui ne fait pas l'objet d'une aversion totale, comme c'est le cas en Occident. L'enquête reste malgré tout difficile, tant les sources disponibles reflètent surtout les fantasmes des observateurs. Revisitant les théories ethnologiques classiques, G. Guille-Escuret refuse l'explication simpliste du cannibalisme par la « pression démographique ».

Un vieux stéréotype, d'inspiration malthusienne, voudrait en effet qu'une population trop nombreuse, ayant épuisé les ressources de l'écosystème, consommerait de la chair humaine pour combler un déficit en protéines. En réalité, l'innovation technique et les transformations sociales permettent souvent de repousser le seuil d'adap-



tation d'une population à son environnement. La dimension explicative historique s'avère plus fructueuse : c'est dans les moments de crise sociale que l'on observe les flambées de cannibalisme.

En Chine, il a existé une anthropophagie guerrière traditionnelle, qui s'est réapparue en périodes de violences (comme pendant la Révolution culturelle, dans les années 1960-1970). Des soldats japonais l'ont pratiquée, pendant la Seconde Guerre mondiale, pour conjurer la humiliation de la défaite. En Méésie et en Indonésie, la chasse aux têtes et l'exocannibalisme constituent un fonds culturel ancien. Mais les bouleversements provoqués par l'envahisseur asiatique (Sumatra) ou l'arrivée de marchands européens (Nouvelle-Bretagne) engendrèrent une accentuation anormale de ces pratiques. Une façon pour l'auteur d'affirmer que contrairement à ce que l'on pourrait penser la violence résultant d'un ensemble de facteurs contingents, n'est pas l'expression d'une « nature humaine »...

→ Régis Meyran

Dictionnaire de l'ETHNOS



L'EMPIRE DE LA LUNE D'ÉTÉ

Sarah Gwynne
Albin Michel, 2012
(420 pages, 24 euros).

L'idée que des militaires bien équipés sont toujours supérieurs aux guerriers est attirée, mais fautive. Ce récit nourri d'ethnologie, de science militaire et d'histoire le démontre dans le cas des Comanches, des Indiens des plaines qui ont résisté 250 ans à la progression des Blancs, puis à leur « civilisation » et fini par s'intégrer avec réalisme à la nation américaine, malgré les conditions qu'on leur faisait.



Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur :

www.pourlascience.fr