

ÉLECTIONS : ce que les scientifiques ont à dire aux politiques

POUR LA SCIENCE

Avril 2012 - n° 414

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

OBJECTIF MARS

Faire escale
sur des astéroïdes ?

DOSSIER

Science et élections

Nucléaire Les économies d'électricité, un facteur clef négligé

Santé Comment garantir la qualité des soins pour tous

Sécurité La politique française réfutée par la science ?

Scrutin Un vote plus représentatif est possible

M 0267 414 F 6 20 €



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

OBSERVATOIRE DE PARIS

FORMATIONS EN ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE

<http://ufe.obspm.fr/>

Diplômes d'Université en présentiel

<http://duop.obspm.fr/>

Diplôme d'Université ou ECTS. Cours magistraux, conférences, travaux dirigés et observations, assurés par des astronomes de l'Observatoire.

«Explorer et Comprendre l'Univers»

Public et étudiants scientifiques.
Niveau Licence (L1)

Cours magistraux le mardi de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris et stages pratiques : une semaine à l'Observatoire de Meudon et une semaine à l'Observatoire de Haute-Provence. Accès sur le site de la formation aux vidéos des cours filmés.

«Structuration de l'Univers»

Exposés et préparation d'un mémoire.

contact.duop@obspm.fr



Diplômes d'Université à distance

<http://foad.obspm.fr/>

Formations à distance, sur Internet. Diplôme d'Université ou ECTS. Tutorat assuré par des astronomes de l'Observatoire.

«Astronomie et Mécanique Céleste»

Public et étudiants scientifiques.
Niveau Licence (L1)

Distances et Temps dans l'Univers - Du Big Bang aux planètes - Mécanique Céleste, Temps et Calendriers - Phénomènes Soleil, Terre, Lune - Le Soleil - Histoire de l'Astronomie.

contact.amc@obspm.fr

«Fenêtres sur l'Univers»

Public et étudiants scientifiques.

Niveau Licence ou Master (L2, L3, M1) selon les parcours choisis. Mesure de distance et de masse - Instrumentation - Chaîne de mesure et projets.

contact.fsu@obspm.fr

Astronomie pour les Enseignants

<http://formation-professeurs.obspm.fr/>

Travaux pratiques, enseignements théoriques pour les enseignants. Observations. Formations aux technologies de l'informatique et de l'Internet pour l'enseignement de l'astrophysique.

contact.formation-professeurs@obspm.fr

Parrainages

<http://parrainages.obspm.fr/>

Professeurs des écoles, collèges et lycées, demandez un «parrain» ou une «marraine» astronome de l'Observatoire pour vous conseiller et participer à votre projet concernant l'astronomie.

contact.parrainages@obspm.fr



Cours et ressources multimédia En libre accès

<http://ufe.obspm.fr/ressources-multimedia>

Tous niveaux :
élèves, étudiants, professeurs, amateurs, passionnés ...



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-Gésippe, 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 Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe 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 : Faysal Bibi,
Christophe Bonal, Georges Chapouthier, Vincent Courtillot,
Dominique Deande, Stéphane Douady, Sophie Gallé-Soas,
Rosine Lallouët, Patrice Lecoq, Alain Lieury,
Antoine Pelissier, Henri Pessard, Christophe Pichon,
Dominique Pilot-Sigwalt, Denis Savoie.

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

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

Suisse : Servid - Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Crevallée - 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin - 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

SCIENTIFICAMERICAN Editor in chief: Mariette DiChristina. Editors: Ricky Rusting, Philip Yam, Cory Stix, Davide Castelvecchi, Graham Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong. President: Steven V. Lynchcoombe. 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 contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

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

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



ÉDITO

de Françoise Pétry directrice de la rédaction

Science contre opinions

En ces temps électoraux, l'heure devrait être aux débats, ou plutôt à la dispute. Au Moyen Âge, la *disputatio* était un débat codifié autour d'une idée, où tel argument était avancé, tel autre réfuté, tel contre-argument analysé. Contrairement à la discussion qui est un débat d'opinions, la dispute est une joute où les idées s'affrontent, mais qui peut aboutir à une solution admissible par tous. Les débats permettent de lutter contre les idées reçues, de faire naître de nouvelles représentations. Mais pour que ces idées ne soient pas uniquement des opinions, ne soient pas dictées par la seule force de persuasion de l'un des orateurs, elles doivent être étayées.

Est-il le meilleur moyen de conforter des arguments qu'en les fondant sur l'analyse et les données scientifiques ? Si l'opinion est fugace, sujette à des revirements, la science s'inscrit dans la durée, se construit petit à petit, discutant les possibles et la pertinence des options. Elle n'a pas de réponse à tout. Elle doute. Est-ce pour cette raison que les scientifiques ne semblent pas souvent entendus par les politiques ?

Réconcilier la science et la vie de la cité.

Peut-on convoquer la science pour nourrir les débats politiques ? C'est ce que tente le dossier *Science et Élections* (voir page 21). Il dresse un état des lieux dans quatre domaines : l'énergie, la santé, la sécurité et le mode de scrutin. Toutefois, face à une situation complexe, il n'y a pas de réponse unique. Dès lors, les options proposées par les auteurs de ces articles peuvent être sources de débats, mais leurs constats reposent sur des données rigoureuses dont l'objectif est d'alimenter... des disputes politiques. Peut-être pourra-t-on ainsi réconcilier la science et la vie de la cité.

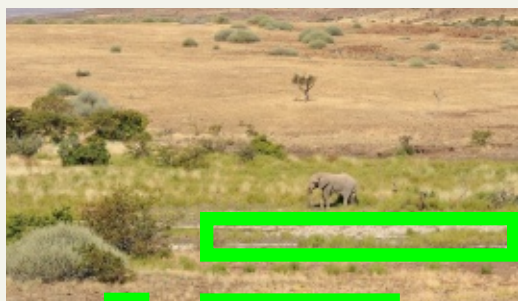
Au Moyen Âge, avaient aussi cours des débats publics, les disputes de quolibet (du latin *quod et libet*, ce qui plaît) où l'assistance pouvait poser toutes les questions qu'elle voulait, et auxquelles les maîtres d'université s'engageaient à répondre. Sans doute les questions étaient-elles parfois impertinentes, ce qui expliquerait que le mot *quolibet* signifie aujourd'hui *raillerie*. Et si, pour éviter l'excès de quolibets dont sont parsemés les débats politiques, on y ajoutait, outre les arguments scientifiques évoqués et la possibilité de poser toutes les questions souhaitées, un peu d'humour en lieu et place des railleries ?

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES

Didier Nardon

Actualités

6 Vénus, une toupie
qui ralentit8 Les destinées
d'un filament liquide8 Effacer la mémoire
de la douleur10 Agriculture contre forêt
africaine à l'âge de fer

...et bien d'autres sujets.

12 ON EN REPARLE

Opinions

14 POINT DE VUE

La diversité des semences
menacée par la loi*Pierre-Henri Gouyon*

15 DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les réseaux
électriques intelligents*Y. Tanguy, C. Auger et C. Tranchita*

18 VRAI OU FAUX

Nos souvenirs sont-ils
éternels ?*Francis Eustache*

19 COURRIER DES LECTEURS

Ce numéro comporte une offre spéciale pour les abonnés France, posée en 4^e de couverture de l'édition abonnés France, une offre d'abonnement *Pour la Science* p. 29 et une sélection de livres *Pour la Science*/Belin en p. 86. En couverture : © Shutterstock/Enrico Gastoni (planète); © Stock Images/Corbis (astéroïde)

À LA UNE

56

EXPLORATION SPATIALE

En route vers Mars

Damon Landau et Nathan Strange

Le programme spatial habité pourrait s'inspirer de l'exploration planétaire robotisée pour transporter des astronautes vers des astéroïdes, puis vers Mars, rapidement et à faible coût.

64

BIOLOGIE ANIMALE

Le retour de la punaise des lits

Kenneth Haynes

Depuis quelques années, les punaises des lits, des parasites suceurs de sang, sont de retour dans des pays où on les avait oubliées. Les scientifiques recherchent leur talon d'Achille.

Science
& élections

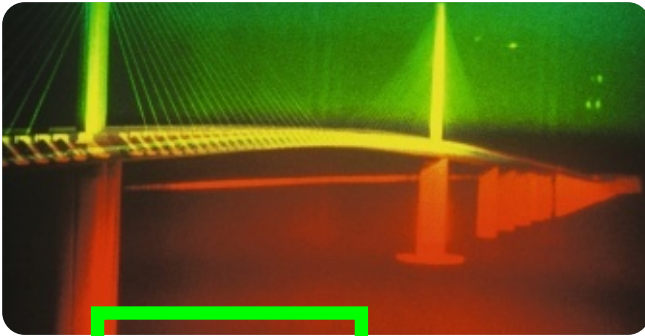
DOSSIER

Mode de scrutin, stratégie énergétique, lutte contre la délinquance, santé publique : ce que les scientifiques ont à dire aux politiques.

72 **PHYSIQUE** L'épopée de l'holographie

Sean F. Johnston

Autrefois emblématique du futurisme, l'holographie n'exerce plus la même fascination aujourd'hui. Pourtant, elle a envahi notre vie quotidienne et suscite des recherches actives.



80 **ARCHÉOLOGIE** L'observatoire solaire le plus ancien d'Amérique

Iván Ghazzi et Clive Ruggles

Occupé dès le IV^e siècle avant notre ère, le site pré-inca de Chanquillo, au Pérou, est doté d'un observatoire. Tout indique qu'il servait à établir un calendrier dans le cadre d'un culte solaire.

22 **NUMÉRIQUE** Le vote par juger !

Michael B. Shor et Nida Laraki

30 **ÉNERGIE** Cher énergie, quel débat ?

Philippe Bouchard

36 **SCIENCES SOCIALES** Politiques de sécurité, quelle efficacité ?

Thomas Piketty

44 **MÉDECINE** Définir un nouveau système de santé : une urgence

André Grimaldi et Olivier Lyon-Caen

Regards

88 **HISTOIRE DES SCIENCES** Le mystérieux abaque de Gerbert d'Aurillac

Alain Schärlig

Au x^e siècle, un jeune moine français inventa un abaque qui, pour la première fois, permettait d'effectuer des divisions. Alors qu'en Occident, on énumérait en chiffres romains, il utilisa une numérotation très proche des chiffres arabes.

92 **LOGIQUE & CALCUL** Pour prouver, tous les moyens sont bons

Jean-Paul Delahaye

Les activités mathématiques ne se réduisent pas à la logique formelle. Dessins, petits films, programmes observés, interactions physiques, etc., sont l'occasion de mener des démonstrations aussi rigoureuses que l'écriture minutieuse des preuves formelles.

98 **IDÉES DE PHYSIQUE** L'anneau bavard, nos chatter ring

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

101 **SCIENCE & GASTRONOMIE** Le fonctionnement des produits

Hervé This

102 **À LIRE**

Rendez-vous sur **POURLA SCIENCE.fr**

» Plus d'informations

- L'intégralité de votre magazine en ligne
- Des actualités scientifiques chaque jour
- Plus de contenus
- 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

→ VIVRE L'ÉGALITÉ DES CHANCES !

Le recto et le verso des liseuses électroniques ne peut que réjouir ceux qui militent pour l'égalité entre tous les nombres entiers.

Depuis trop longtemps, les livres pratiquent une discrimination. Jamais aucun nombre impair n'a eu la moindre chance d'être le nombre de pages d'un livre : quels que soient le sujet d'un livre, sa langue, son époque, le nombre de pages est le double du nombre de feuilles, or le nombre de feuilles est un entier ; donc, même si la pagination s'arrête sur un nombre impair, le nombre effectif de pages est pair.

N'étant pas soumises à l'inséparabilité du recto et du verso, les liseuses électroniques rétablissent les nombres impairs dans la pénitence de leurs droits. Elles réalisent cet idéal démocratique qu'est l'égalité des chances entre nombres pairs et nombres impairs.

→ ON N'EST JAMAIS TROP PRUDENT !

Connaissant depuis longtemps des populations andines, la tomate s'était révélée sans danger pour elles. Mais les Européens la consomment depuis cinq siècles à peine. Rien n'assure que leurs organismes réussissent comme ceux des Andins. Qui sait si en six ou sept siècles d'effets cumulés, la consommation de tomate par des générations successives d'Européens ne va pas favoriser l'émergence de graves maladies, voire de dégénérescences ? Inter-

dire la tomate en Europe serait une sage application du principe de précaution.

→ TROP DE PRESSIONS

Imaginez que je sois le lobbyiste. Mon activité consiste, entre autres, à pousser les médias à publier des informations favorisant les visées du lobby qui m'emploie. Elle consiste aussi à peser sur les décideurs, eux dont les choix peuvent rapporter gros – ou coûter cher. Plus un décideur a de pouvoir, plus je consacre de soin à me renseigner à son sujet, afin de disposer, lorsque je m'adresse à lui, d'une argumentation sur mesure, adaptée à sa personnalité, adroitement conçue pour le séduire, le circonvenir, l'amener à penser et à agir selon les intérêts du lobby.

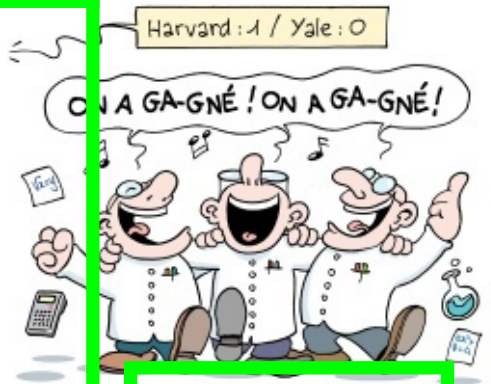
Interprétons l'expérience de pensée ci-dessus. Un citoyen ordinaire subit une propagande intense, et le combat que sa lucidité doit mener est souvent perdu. Mais, à coup sûr, les hauts responsables subissent une propagande encore plus intense. Je ne doute pas que les ministres et les dirigeants disposent d'informations exactes que nous n'en avons pas, mais je ne doute pas non plus que, objets des attentions assidues de lobbyistes de tous genres, ils reçoivent un flot d'informations manipulées infiniment plus soutenu, insidieux, violent, que nous n'en recevons. Quoi qu'ils disent, sur quelque problème que ce soit, on peut les soupçonner d'être sous l'emprise d'un lobby. Les positions élevées ne sont pas celles qui offrent les points de vue les moins biaisés sur la société.

→ RUSES DE CHINOIS

Les universités françaises rêvent de gagner des places dans le classement de Shanghai. À cette fin, elles se plient à des normes qui ne leur sont pas forcément adaptées, et elles s'en font des carcans – tout en prônant l'innovation. Elles placent leurs espoirs de salut dans les « pôles d'excel-

lence », ce qui les mène à dépenser une grande énergie pour regrouper les laboratoires et créer de tels pôles. Elles prétendent pouvoir quantifier la valeur des chercheurs en calculant des indices de facteur d'impact aussi sophistiqués que les querelles byzantines. Cependant, elles muent les chercheurs en écrivains, et les astreignent à d'incessantes tâches bureaucratiques...

Paradoxe : en gaspillant des forces et du temps dans des réorganisations administratives censées les aider à améliorer leur rang, les universités françaises se pénalisent. C'est à se demander si, en inventant le classement de Shanghai, les Chinois n'ont pas eu recours à une ruse inspirée du cheval de Troie.



→ LES LOIS DE L'HISTOIRE

On a souvent dit que le personnage dont on va faire connaissance a, comme tout le monde, un front, une bouche, deux yeux, un nez, etc. On est toujours surpris par son visage. À partir d'un thème apparemment limité, la nature varie les visages humains à l'infini.

De même, il se peut que les lois de l'histoire soient en nombre limité, quoique les événements varient à l'infini. On est surpris quand ils se réalisent, mais on se rend compte, après coup, qu'ils sont dus à des phénomènes constants : les rivalités de pouvoir, les élans et leur récupération, la fascination pour un chef, la propagande, le combat entre générosité, sincérité, idéalisme et cupidité, rouerie, réalisme, etc.



Les lois de l'anatomie ne permettent pas de prévoir le visage qu'auroit l'enfant à naître. Qu'on ne puisse pas prévoir la tournure que va prendre l'événement ne prouve donc pas qu'il n'y a pas de lois de l'histoire.

→ FACEBOOK DU TEMPS JADIS

Les réseaux sociaux étaient en partie des confidences que leurs auteurs feraient mieux de garder pour eux ? C'est vrai mais, depuis longtemps, le livre, lui aussi, bouscule les barrières de l'intime. Rien ne prouve qu'un auteur agit sagement lorsqu'il publie ses idées ou ses émotions, au lieu d'en parler avec ses seuls proches. En les diffusant, il perd tout contrôle sur la façon dont elles sont interprétées.

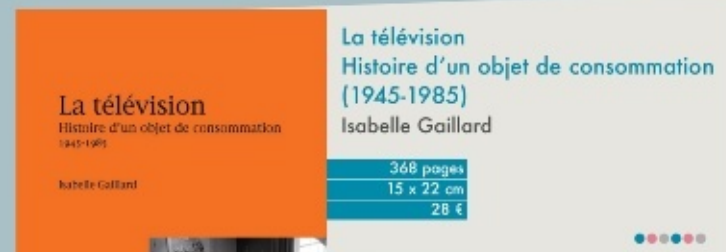
En montrant les grands de ce monde en gros plan, les vidéos donnent avec eux une proximité illusoire ? C'est vrai mais, depuis longtemps, le livre, censé permettre « d'entretenir contact avec les meilleurs esprits du passé », entretient le même genre d'illusion. Entrer en contact avec un être humain, c'est-à-dire avoir un échange vivant avec lui, est autre chose, en vérité, que lire le livre qu'il a écrit. En outre, il n'est pas acquis que ceux qui choisissent de publier soient les « meilleurs esprits » d'une époque.

La culture numérique va plus loin dans les mêmes voies que la culture livresque. Peut-être, alors, l'hostilité au numérique de certains tenants du livre s'explique-t-elle par le fait qu'ils supportent mal le grossissement des défauts de la culture livresque que leur renvoie la culture numérique. Éternelle querelle des Anciens et des Modernes...



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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

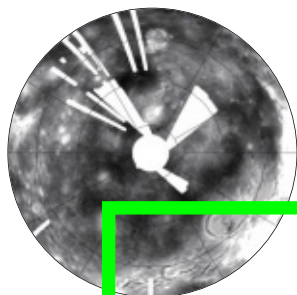
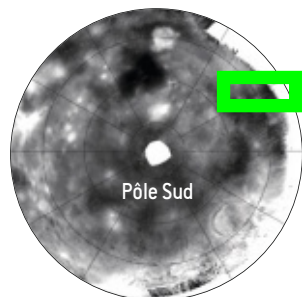


* ventes@cths.fr * vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr * Distribution SODIS

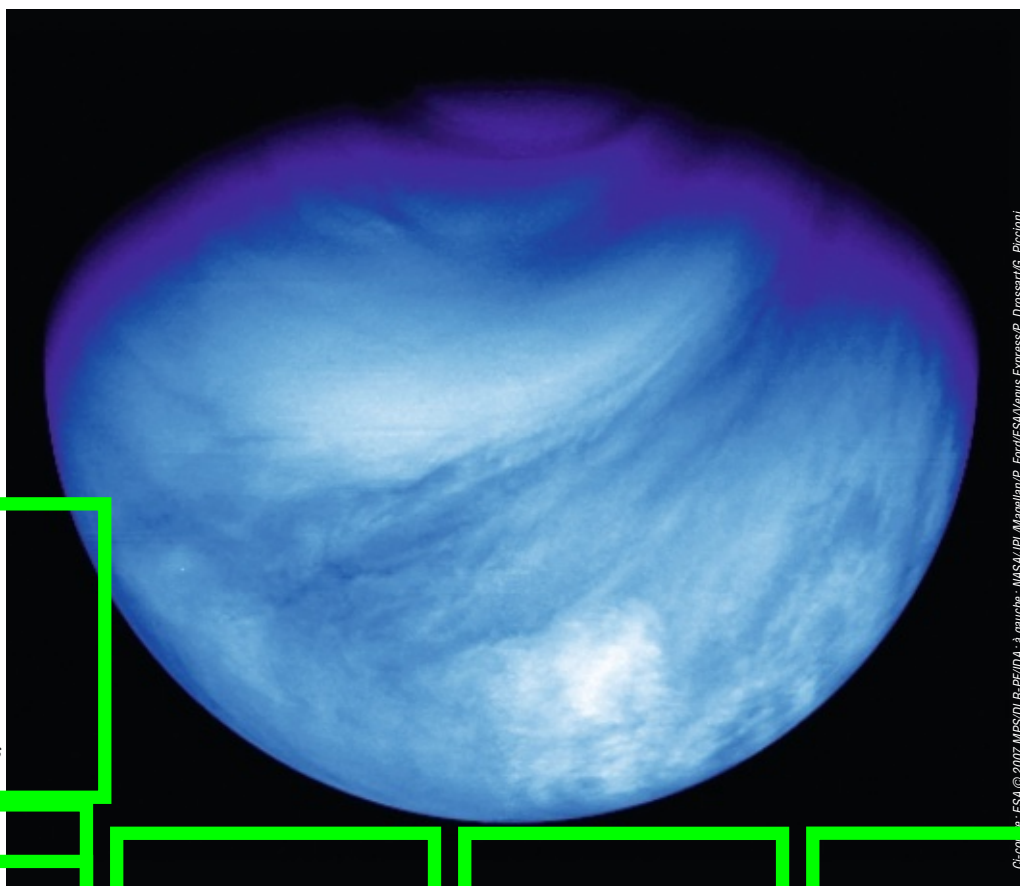
Astronomie

Vénus, une toupie qui ralentit

Un décalage entre les cartes topographiques de Vénus établies par les sondes *Magellan* et *Venus Express* ne s'explique que par le ralentissement de la rotation de la planète.



L'hémisphère Sud de Vénus vu en ultraviolet par la sonde *Venus Express* (ci-contre, en fausses couleurs) et les cartes topographiques correspondantes établies par les sondes *Magellan* (en haut) et *Venus Express* (en bas). La superposition des deux cartes révèle un décalage pouvant atteindre 20 kilomètres dû à la diminution de la vitesse de rotation de Vénus.



Crédit : ESA © 2007 MPS/DLR-FFDA, à gauche : NASA/JPL, Magellan/P. Ford/ESA/Venus Express/P. Drossart/G. Piccioni

La durée du jour s'allonge de 6,5 minutes quotidiennement sur Vénus ! C'est ce qu'affirment Pierre Drossart et Stéphane Érad, de l'Observatoire de Paris, et leurs collègues, qui ont analysé la cartographie de la surface vénusienne réalisée par la sonde européenne *Venus Express*.

Vénus est entourée d'une épaisse atmosphère dense et opaque, qui dissimule sa surface aux observations en lumière visible. C'est pour quoi sa période de rotation est longtemps restée controversée. Il a fallu attendre 1962 pour que des observations radar depuis la Terre permettent de constater et révèlent que Vénus fait un tour sur elle-même en 243 jours terrestres. Depuis, plusieurs mis-

sions spatiales ont visité Vénus. La sonde américaine *Magellan*, notamment, a observé la surface au radar au milieu des années 1990, livrant la première carte topographique précise et affinant la mesure de la période de rotation. Et depuis 2006, c'est *Venus Express*, avec son spectromètre infrarouge VIRTIS, qui fait de même.

P. Drossart, S. Érad et leurs collègues ont comparé les cartes topographiques établies par *Venus Express* avec celles de *Magellan*, afin d'étudier ces particularités locales. De façon surprenante, certains reliefs ne sont pas à la même place sur les deux cartes. Le décalage atteint 0,15 degré en longitude, soit près de 20 kilomètres à l'équateur. Les diverses sources d'erreur ayant

été écartées, les astronomes ont conclu que le décalage provient d'une modification de la vitesse de rotation de la planète depuis les mesures de *Magellan*, 20 ans plus tôt. La durée du jour sidéral vénusien est ainsi allongée de près de 6,5 minutes par jour vénusien !

Ce décalage est 50 fois supérieur à la marge d'erreur de la mesure de *Magellan*, et ne peut donc lui être imputé. Par ailleurs, les résultats de *Venus Express* sont en accord avec des observations radar récemment menées depuis la Terre.

Quelle est l'origine du ralentissement ? L'explication la plus probable est que l'interaction de la surface et de l'atmosphère. Cette dernière est si dense – la pression dépasse 90 bars au sol !

– que les frottements qu'elle exerce sur la surface modifient la rotation de la planète. La partie supérieure de l'atmosphère tourne si vite (en quatre jours environ) que la basse atmosphère, à l'interface avec le sol, est agitée d'une turbulence qui multiplie les frottements au point de freiner la rotation. Un phénomène analogue agit sur Terre, à l'interface océans-croûte, mais son effet est négligeable.

Mesurer la vitesse de rotation nous renseigne indirectement sur les propriétés du *palmyre* de Vénus, plus celui-ci est dense et rigide, moins la planète sera sensible au ralentissement.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

Icarus, n° 217 (2), pp. 171-180, 2012

Paléontologie

Des traces sociales d'ancêtres d'éléphants



Vue aérienne des traces fossilisées laissées par un groupe de proboscidiens

Loin des déserts de sable actuels, la région des Émirats arabes unis était, il y a sept millions d'années, traversée par plusieurs rivières. Des proboscidiens ancêtres des éléphants actuels ont laissé des empreintes dans une boue fine, qui s'est fossilisée, puis a été protégée sous des couches de sédiments. L'érosion récente a dégagé ces marques qui révèlent le passage d'un troupeau d'au moins 13 proboscidiens, et des traces d'un autre congénère passé au même endroit que le groupe à quelques heures ou jours d'intervalle. L'étude des traces permet d'estimer le poids de chaque animal. Le proboscidien solitaire – le plus massif, pesant entre cinq et six tonnes – était probablement un mâle vivant en marge du groupe composé d'adultes, peut-être uniquement des femelles, accompagnées de leurs petits. Ces proboscidiens vivaient dès la fin du Miocène, les proboscidiens vivaient en sociétés matriarcales avec des mâles rejoignant les troupes uniquement pour la saison de reproduction, comme c'est le cas des éléphants d'aujourd'hui.

→ Sean Bailly

F. Bibi et al., *Biology Letters*, en ligne, 22 février 2012

Géophysique

Comment migrent les dunes

Le parc national américain de White Sands, au Nouveau-Mexique, abrite un désert de sable de gypse, ce qui lui confère une couleur blanche étonnante. En suivant la direction du vent dominant du Sud-Ouest, on rencontre d'abord une crête de sable de dix mètres de haut, puis des barkhanes en forme de croissant; enfin, au bout de sept ou huit kilomètres, les croissants s'inversent et présentent la partie concave face au vent. Autre particularité, ces dernières dunes sont recouvertes de végétation. Douglas Jerolmack, de l'Université de Pennsylvanie, et ses collègues expliquent ces changements de forme par un ralentissement du vent à mesure de sa traversée du désert.

À l'aide d'un suivi altimétrique sur cinq ans, les géologues ont bien sûr constaté que les dunes se déplacent dans la direction du vent, mais surtout que toutes les dunes n'avancent pas à la même vitesse: les premières dunes s'avancent plus vite que les suivantes. Le vent a un rôle crucial dans leur déplacement. Mais pour comprendre comment



Le vent agit à mesure qu'il interagit avec les dunes, lesquelles avancent alors moins vite, laissant prise à la végétation et changent de forme.

sent-elles et changent-elles de forme? D'après D. Jerolmack, le vent, en emportant le sable, faiblit à mesure de son interaction avec les dunes. Or ces dernières avancent d'autant plus vite que le vent est fort. À l'Ouest, les dunes sont moins propices pour laisser le temps aux plantes de prendre racine. Lorsque les dunes sont suffisamment ralenties – environ deux

mètres par an –, les plantes s'installent de préférence aux extrémités des dunes en forme de croissant, et contribuent à immobiliser ces zones. Le vent continue de pousser les dunes jusqu'au point de retourner la dune, qui passe alors à une deuxième dune à une forme parabolique en U.

→ S. B.

Nature Geoscience, en ligne, 5 février 2012

GEMÉES, PRÈS 32 000 ANS

Une plante vieille de 32 000 ans vient d'être ressuscitée par l'équipe de Svetlana Yashina, de l'Académie russe des sciences. Les chercheurs avaient trouvé, à 38 mètres de profondeur dans le pergélisol, dans le terrier congelé d'un écureuil arctique, trois fruits de la petite plante herbacée vivace *Silene stenophylla*. Après avoir tenté en vain de les faire germer, ils en ont extrait du tissu placodermique et ont placé sous température contrôlée les graines. Une jeune pousse est apparue.

L'ALCOOL, UN MÉDICAMENT ?

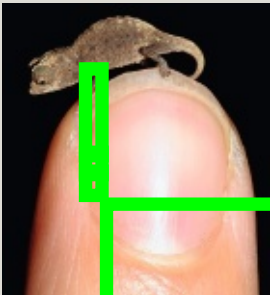
Pour les mouches du vinaigre, oui, ont montré des biologistes américains. Les mouches sont la cible de guêpes parasites, qui pondent dans leurs larves. Les larves de guêpe se nourrissent alors de leur hôte. Les biologistes ont observé que quand une larve de mouche est parasitée, elle privilégie les aliments fermentés. Les mouches du vinaigre ont développé une résistance à l'alcool qui leur permet de supporter des doses qui tueraient des guêpes, sont létales.

UNE INVASION UTILE

En Australie, une plante toxique envahissante du genre *Bryophyllum*, originaire de Madagascar, aurait préparé les scinques à la langue bleue (lézards de l'espèce *Lilica scincoides*) à un autre envahisseur venu d'Amérique: le crapaud-buffle. Selon Richard Shine, de l'Université de Sydney, et ses collègues, les populations de lézards qui se nourrissent de la plante ont développé une résistance à sa toxine. Or le crapaud-buffle sécrète une toxine voisine, mortelle pour ses prédateurs, tels les lézards; ceux exposés à la plante y sont alors moins sensibles.

En bref

LE PLUS PETIT REPTILE



P. L. S. One/F. Glaw et al.

Avec une longueur de trois centimètres (croupe comprise), le caméléon *Brookesia micra*, qui vit sur l'île de Nosy Be dans le Nord de Madagascar, est le plus petit reptile connu au monde ce jour.

IMPLANT ET OSTÉOPOROSE

Une micropuce implantée sous la taille : tel est le dispositif conçu par une équipe américaine pour traiter l'ostéoporose et remplacer le stylo à injection quotidienne. Testé chez sept femmes de 65 à 70 ans, la micropuce programmable et activable à distance a libéré une dose de médicament par jour pendant 20 jours. Bien toléré par les patientes, le traitement a amélioré la formation de tissu osseux. Reste à augmenter la capacité du dispositif afin d'allonger le temps de traitement.



© Shutterstock/PERLINK

La molécule PKMζ, essentielle à la « mémoire douloureuse », pourrait être inhibée pour éteindre les douleurs aiguës ou chroniques.

Physique

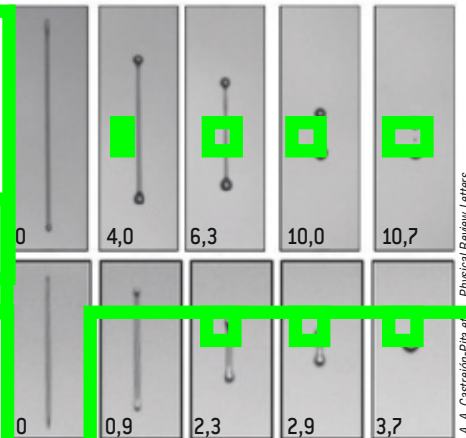
Les destinées d'un filament liquide

Le fractionnement d'un jet liquide en chute libre est un phénomène complexe, mais l'équipe d'Alfonso Castrejón-Pita, de l'Université de Cambridge, a établi que deux paramètres principaux le contrôlent.

Le premier de ces paramètres est le rapport d'aspect, c'est-à-dire la longueur du filament liquide divisée par son épaisseur ; le second, le nombre d'Ohnesorge, mesure le quotient des forces visqueuses par la racine carrée des forces de surface et des forces d'inertie.

Avec ces liquides à nombre d'Ohnesorge élevé, les physiciens ont créé des filaments de divers rapports d'aspect à l'aide d'un générateur de jets, et observé leur chute à l'aide d'une caméra rapide. Ils ont ainsi mis en évidence deux grandes zones sur le diagramme qui caractérise le comportement des filaments en fonction des deux paramètres : dans la première zone, les filaments oscillent dans leur longueur, mais finissent par se ramasser en une goutte. Dans la seconde zone, ils finissent au contraire par se fractionner.

En fait, le rapport d'aspect et le nombre d'Ohnesorge régissent de façon efficace un comportement qui est gouverné à la fois par la forme du filament, sa densité, sa tension de surface, sa résistance à l'écoulement, voire le mouve-



A. A. Castrejón-Pita et al., Physical Review Letters

Un filament liquide qui s'est décroché de sa source et qui est en chute libre peut osciller jusqu'à se fragmenter (en haut) ou se ramasser en une seule goutte (en bas, pour un liquide plus visqueux). Le temps est indiqué en millisecondes.

ment de rotation imprimé au liquide ou les changements de température... Ces paramètres interviennent dans la façon dont, après que la séparation du liquide d'avec l'embout a créé une onde de surface, celle-ci se propage vers le bas du jet, s'y réfléchit, puis interfère avec elle-même. C'est ainsi que se forment les nœuds d'une corde de guitare en vibration, une succession de perles et de rétrécissements le long du filament liquide, et qui finissent par se briser. Les expériences de l'équipe d'A. Castrejón-Pita mettent un peu d'ordre dans ces phénomènes complexes.

→ François Savatier

A. A. Castrejón-Pita et al., Physical Review Letters, à paraître

Neurobiologie

Effacer la mémoire de la douleur

Une douleur qui dure plus de trois mois peut devenir insupportable et avoir des conséquences graves, provoquant de l'anxiété, voire une dépression. Or, sept millions de Français souffrent de douleurs chroniques, et les traitements sont rarement efficaces. Après Laferrière, de l'Université McGill à Montréal, et ses collègues ont montré chez le rat qu'en inhibant la molécule PKMζ, essentielle à la « mémoire » de la douleur, ils éteignent la douleur chronique.

La douleur modifie la force des connexions entre neurones dans certaines régions du système nerveux central, en particulier la

corne dorsale de la moelle épinière, là où arrivent les fibres nerveuses de la périphérie. Une forme de mémoire de la douleur s'inscrit dans ces neurones via un mécanisme de plasticité neuronale nommé potentialisation à long terme. Plus la corne dorsale entre deux neurones est stimulée, plus elle se renforce et plus elle reste active sur le long terme.

C'est ainsi que la protéine kinase PKMζ participe à cette mémoire de la douleur. Les neurobiologistes ont utilisé un modèle animal de la douleur chronique en injectant dans leur peau des produits, telle la capsaïcine, qui excitent les fibres douloureuses et

provoquent des douleurs prolongées. Ils ont alors constaté que la production de PKMζ est augmentée dans les neurones de la corne dorsale. Et s'ils bloquent cette production avec un inhibiteur spécifique de PKMζ, la plasticité neuronale disparaît, ainsi que la douleur. Dans un autre modèle, où les rats subissent une lésion du nerf sciatique, l'inhibition de PKMζ abolit la douleur chronique, présente normalement trois semaines après la blessure. Cette molécule pourrait être une cible potentielle pour le développement de nouveaux traitements de produits antidouleurs.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

A. Laferrière et al., Molecular Pain, janvier 2012

Éthologie

L'accent des chèvres

Quand une assemblée se rassemble, et des individus vivant en groupes développent souvent des traits comportementaux communs. On observe que les humains qui grandissent dans une même région acquièrent un même accent. Selon Elodie Briefer et Alan McElligott, de l'Université Queen Mary, à Londres, il en est de même de chèvres élevées ensemble.

Les chèvres vivent en groupes composés de quelques femelles et de leurs petits. Les biologistes ont analysé certains de leurs cris, nommés appels de contact, qui leur servent à se reconnaître en cas de séparation. Ils ont montré que les chevreaux d'un même groupe développent des « accents » similaires : leurs cris sont de plus en plus semblables au fil du temps. Quelques autres espèces sont connues pour adapter leurs cris à leur environnement. Les oiseaux, par exemple, vont jusqu'à imiter des sons totalement nouveaux pour eux. Les chèvres n'en font pas, mais leurs cris sont également influencés par un apprentissage social.

→ Guillaume Jacquemont

Elodie Briefer et Alan McElligott, *Animal Behaviour*, en ligne, 16 février 2012

Archéologie

Le trésor de Gessel

Un trésor de l'âge du bronze vient d'être présenté au public à Hanovre. En avril 2011, des sondages archéologiques sont réalisés avant la construction du tronçon du gazoduc russe Nordstream qui traverse la Basse-Saxe. À Gessel, près de la ville de Syke, ils révélèrent des restes d'aiguilles en bronze et ce qui semble être un bracelet d'or richement orné, le tout surmontant d'autres objets. Les archéologues découvrent vite qu'il s'agit du contenu d'un sac de lin fermé à l'aide de quatre aiguilles de bronze, puis enterré à plus d'un mètre de profondeur. Dégagé, son contenu livra 117 objets. Il s'agit surtout de spirales d'or (dont 90 sont combinées pour former huit guirlandes de dix anneaux et deux de cinq), de deux torques (colliers faits de tiges recourbées) et d'une grande épingle à habits (fibule) ornée de spirales d'or. Le trésor date de la deuxième moitié du XIV^e siècle avant notre ère, soit à l'âge du bronze moyen, l'époque du mégalithisme et des tumulus préceltiques.

→ F. S.



Les 117 objets constituant le trésor de Gessel (1,8 kilogramme au total) ont été réalisés à partir d'or recyclé (qui proviendrait d'Asie centrale) conformé en anneaux, torsadés ou torsadés.

Physique

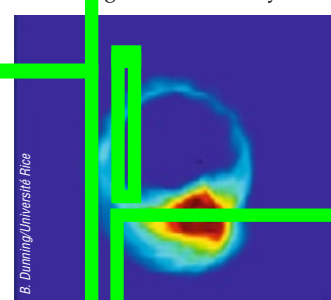
Un électron qui se prend pour un nuage d'astéroïdes

Dans une vision classique, l'atome est souvent représenté comme un système solaire réduit, avec des électrons en orbite autour du noyau, à l'instar des planètes autour du Soleil. L'atome est bien mieux décrit par la mécanique quantique : le noyau est entouré d'un « nuage » qui représente la densité de probabilité de présence des électrons. Cependant, soumis à un champ électrique externe, un électron dans un atome excité peut adopter un comportement « classique », rappelant celui des planètes ou des astéroïdes. Les physiciens Erwin Dunning et ses collègues de l'Université Rice, à Houston, ont réussi à obtenir un tel phénomène en laboratoire.

Le comportement ondulatoire des particules en mécanique quantique est très différent de notre expérience macroscopique classique. Par exemple, les particules n'ont pas une position bien définie : la fonction d'onde d'une particule porte l'information de la probabilité de trouver l'électron à un endroit donné de l'espace lors d'une mesure. En 1926, le physicien autrichien Erwin Schrödinger avait suggéré qu'il était possible d'obtenir un comportement classique à partir d'un système quantique, ce qu'on nomme la limite semi-classique. Dans le cas d'un atome, on peut créer un tel état en excitant l'atome de façon que la fonction d'onde de l'électron soit concentrée dans une région limitée et que ce petit « paquet d'ondes » tourne sur une orbite circulaire autour du noyau, un peu comme les planètes autour du Soleil. Cependant, le paquet d'ondes s'étend au fil du temps pour donner un nuage de densité de probabilité étendu après quelques nanosecondes.

En 2007, l'équipe de Tom C. Lagher, de l'Université de Virginie, a montré qu'il était possible de créer des états qui ne se dispersent

pas : dans le cas de l'électron atomique, il faut utiliser des champs électriques externes successifs. Le premier champ électrique met l'atome dans la configuration quantique recherchée, puis un second, dont la fréquence est synchronisée avec celle de la rotation du paquet d'ondes autour de l'atome, stabilise le système. B. Dunning et ses collègues ont perfectionné le dispositif avec un atome de potassium excité dans une configuration dite troyenne,



Dans l'atome que les chercheurs ont excité avec des champs électriques appropriés, la densité de probabilité de présence de l'électron est concentrée dans un « paquet d'ondes » qui tourne autour du noyau situé au centre de l'image.

car elle rappelle le comportement des astéroïdes troyens de Jupiter. Ceux-ci occupent des nuages allongés qui suivent la même orbite que Jupiter, mais 60 degrés en avant et en arrière de la planète. Points d'équilibre de l'influence combinée du Soleil et de Jupiter, ces deux régions sont stables d'un point de vue gravitationnel : les astéroïdes s'en échappent difficilement. De la même façon, le paquet d'ondes de l'électron a une forme allongée et est stabilisée par l'influence combinée du champ électrique externe et de celui du noyau.

→ S. B.

B. Wyker et al., *Physical Review Letters*, vol. 108, 033001, 2012

Brèves

VESTIGES DE FER

Notre chroniqueur immergé dans des groupes d'étudiantes en archéologie fêrues du sable et friandes de fouilles proches de la côte, a vu exhumer une antique maison sentant le vieux chou, pas tassée et pleine de traces de roquette découverte sous une sorte de maison entoillée. On l'a fêtée, elle était intacte. Mais tous ceux qui ont voulu la toucher pensent qu'elle est une bonne pub se sont brulés, on les a recensés : les tôles sont trop sensibles au climat.

(11 contrepièteries, titre compris)

DETECTION ERRANTE

Faute de Margret pour attraper leurs neutrinos, on voit à Genève de jeunes Polytechniciens excités devant des bosons (les higgs sont parfois maltraités par certains chroniqueurs). Appréhendant des cables arrachés, ils contrôlent mal leurs erreurs sur les sections de certains conducteurs dont ils découvrent le calibre. Bizarres, leurs calculs des higgs avant leurs connexions. On parle de thèse aberrante et les travailleurs du CERN se sentent boxés.

(10 contrepièteries, titre compris)

Le 1^{er} avril, si vous trouvez sur notre site quelques maîtres pour résoudre les contrepièteries de Maël Jortin.

www.pourlascience.fr



En Afrique, la forêt tropicale a été partiellement remplacée par la savane il y a 3 000 ans.

Géophysique

L'origine des trapps de Steens-Columbia River

Le plateau de Steens-Columbia River couvre plusieurs États du Nord-Ouest des États-Unis. Il s'agit d'épais épanchements basaltiques, nommés trapps et vieux de 17 millions d'années. Pour expliquer la formation rapide – en deux millions d'années environ –, il faut invoquer un apport de chaleur important, prenant sa source en profondeur et conduisant à l'épanchement d'une grande quantité de magma. Les trapps de Steens-Columbia River sont ainsi souvent associés au point chaud actif de Yellowstone, qui se déplace d'Ouest en Est. Or les trapps s'étendent perpendiculairement, du Nord au Sud, sur 900 kilomètres : leur origine serait donc différente. Cependant, la tectonique des plaques tectoniques (où une plaque s'enfonce sous une autre) échoue également à expliquer la naissance de cette formation géologique.

Lijun Liu et Dave Stegman, de l'Institut d'océanographie de l'Université de San Diego, ont étudié un scénario inédit fondé sur le mouvement de subduction de la plaque océanique Farallon, qui a aujourd'hui totalement disparu sous la plaque nord-américaine. Selon le scénario de ces deux chercheurs, cette plaque s'est brisée sous les effets combinés de la tension dans la plaque, due à son propre poids, et de l'érosion thermique créée par la roche plus chaude sous-



Les gorges de Little Blitzen appartiennent à la chaîne des montagnes Steens, une partie des trapps. Elles ont été creusées au cours de la dernière période glaciaire.

jacente. La rupture se serait étendue sur 900 kilomètres et aurait créé un point chaud : en raison de la décompression rapide, la roche s'est échauffée, formant une grande quantité de magma qui a traversé la plaque continentale et s'est épanchée en surface. La formation des trapps aurait cessé au bout de deux millions d'années, sous l'épanchement des deux parties de la plaque Farallon.

→ S. B.

L. Liu et D. R. Stegman, *Nature*, vol. 482, pp. 386-390, 2012

Archéologie

Agriculture contre forêt africaine à l'âge du fer

Il y a 3 000 ans, une partie de la forêt tropicale d'Afrique centrale a cédé la place à des savanes. On l'explique souvent par un changement climatique local. Selon Germain Bayon et ses collègues de l'IFREMER Bretagne, l'arrivée des peuples d'agriculteurs aurait aussi joué un rôle.

En analysant une carotte de sédiments marins prélevée au large du Congo, les chercheurs ont montré que l'érosion des sols a augmenté brutalement il y a 3 000 ans, ce qui traduirait l'adoption de pratiques agricoles locales intensives pour transformer l'environnement. La carotte analysée est en partie constituée

d'argiles, issues du bassin-versant du fleuve Congo. Elles s'y sont formées par sédimentation des éléments libérés par l'érosion chimique. Les pratiques agricoles qui dissolvent les minéraux des roches-mères, notamment via les pluies.

La composition des argiles reflète l'intensité de cette érosion, car certains éléments très mobiles, tels que le potassium, sont évacués par les eaux de ruissellement dès qu'ils sont dissous, avant même d'être incorporés dans les argiles ; ils se retrouvent donc lorsque l'érosion est intense. Or il y a 3 000 ans, les argiles se sont brutalement appauvries en ces éléments.

Les vestiges archéologiques montrent qu'à cette époque, les Bantous, un peuple d'agriculteurs maîtrisant la technologie du fer, vivaient en Afrique centrale. G. Bayon et ses collègues pensent que l'introduction des pratiques agricoles a favorisé l'érosion chimique dont l'intensité montre que ces pratiques étaient assez importantes pour transformer l'environnement. Dans leur quête de nouvelles terres à cultiver, les Bantous auraient ainsi défriché de nombreux arbres, accélérant la déforestation engendrée par le changement du climat.

→ G. J.

G. Bayon et al., *Science*, vol. 335, pp. 160-163, 2011

Physique

Neutrinos : un coup de frein ?

En septembre 2011, les physiciens de l'expérience OPERA, au laboratoire du Gran Sasso en Italie, avaient prudemment annoncé que certains neutrinos se déplaceraient à des vitesses supérieures à celle de la lumière dans le vide. Or cette dernière est une limite maximale dans le cadre de la théorie de la relativité restreinte, un des piliers de la physique moderne. Cependant, le CERN a indiqué le 23 février 2012 l'identification de deux nouvelles sources d'incertitudes dans la mesure. D'une part, une horloge de référence avait un rythme trop rapide de un pour dix millions, ce qui avait pour effet de diminuer la vitesse mesurée. D'autre part, un branchement instable d'une fibre optique, reliant le détecteur sous terre au récepteur du système de géolocalisation GPS en surface, augmentait la vitesse mesurée des particules. L'avance de 60 nanosecondes dans le temps de trajet des neutrinos «supraluminiques» pourrait ainsi s'effacer lors de nouveaux tests d'ici mai prochain.

Astrophysique

Excès d'oxygène dans le Système solaire

Le Système solaire se déplace à 26 kilomètres par seconde par rapport aux nuages de gaz et de poussière qui l'entourent. Ce mouvement crée un vent de particules du milieu interstellaire en direction du Soleil. En étudiant ce flux avec le satellite IBEX, une équipe internationale d'astrophysiciens a découvert que la concentration en oxygène du Système solaire semble différente de celle du milieu interstellaire.

Une grande partie du vent galactique est repoussée par le champ magnétique du Soleil et le vent solaire, flux de particules rapides émises par notre étoile. La région où les vents se rencontrent, nommée héliopause, se situe à 15 milliards de kilomètres du Soleil. Le champ magnétique et le vent solaire bloquent la pénétration de la plupart des particules chargées, mais pas des atomes neutres.

Depuis le lancement d'IBEX en 2008, la nature des atomes en

provenant du milieu interstellaire est analysée. En effet, Peter Bochsler et ses collègues, le milieu interstellaire semble plus pauvre en oxygène que le Système solaire.

L'incertitude sur cette mesure, difficile car la détection directe d'atomes neutres est plus compliquée que celle de particules chargées, est importante. Mais si le résultat se confirme, il est surprenant. L'oxygène galactique a été produit dans les toutes premières étoiles massives de façon uniforme à travers la galaxie. La composition en oxygène du milieu interstellaire et celle du Système solaire devraient donc être sensiblement les mêmes. Une explication possible est que l'oxygène du milieu interstellaire est piégé dans les grains de poussière et de la glace, qui ne pénétreraient pas l'héliopause.

→ S.B.

P. Bochsler et al., *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 198, article 13, 2012



Onde de choc entre un nuage de gaz et l'étoile LL Ori dans la nébuleuse d'Orion. Le Système solaire est le siège d'un phénomène similaire.

Neurobiologie

Maltraitance dans le cerveau

Martin Teicher et ses collègues de l'Université Harvard ont mesuré le volume de trois «couches» de l'hippocampe (une région cérébrale impliquée dans la mémoire et les émotions) de 193 adultes âgés de 18 à 25 ans et maltraités avant l'âge de six ans. Elles sont plus petites d'environ cinq pour cent que celles d'adultes non maltraités. Ces adultes avaient souffert de diverses agressions corporelles ou verbales, ou assisté à des scènes domestiques violentes. Quelques années plus tard, ils présentent une diminution de volume du CA3, du gyrus denté et du subiculum. C'est la première fois que l'on observe une telle variation dans le subiculum, la région de l'hippocampe qui inhibe notamment l'axe du stress, dont l'activation engendre la libération des hormones du stress. En outre, le stress subi serait directement responsable de cette particularité structurelle de leur hippocampe, indépendamment de tout trouble mental. La diminution de volume de l'hippocampe pourrait ainsi indiquer un risque d'apparition des troubles de l'humeur, de l'anxiété et de maladies psychiatriques.

→ B.S.-L.

Psychological Science, février 2012

DERNIÈRE minute ...

DES MICRO-ADN DANS LES CELLULES

Une équipe américaine a découvert chez la souris et l'être humain que les cellules contiennent de très nombreux petits fragments d'ADN circulaires extrachromosomiques (notés eccADN). Pour la plupart, longs de 200 à 400 paires de bases, ces morceaux résultent d'excisions dans les chromosomes de cellules nerveuses, hépatiques, etc. Étonnamment, ils sont plus courts

dans les cellules tumorales. Ils pourraient participer à une sorte d'hérédité non mendélienne.

CANNABIS ET MÉMOIRE

Le cannabis perturbe la mémoire de travail, notre capacité à traiter des informations stockées temporairement – en activant des récepteurs situés non pas sur les neurones de l'hippocampe, comme on le pensait, mais

sur ses cellules astrogliales, qui servent de support aux neurones. On commence à comprendre le rôle de ces cellules, voire utiliser le cannabis en traitement (contre la douleur, notamment) sans perturber la mémoire.



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

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ POISSON CONTRE POISSON

Plus de deux pour cent des adultes et cinq pour cent des enfants souffrent d'allergies alimentaires. Dans un dossier de 2007, les médecins hospitaliers toulousains Fabienne Rancé et Guy Dutau faisaient le point sur le problème de santé publique que représentent ces pathologies (voir le dossier « Allergies alimentaires », *Pour la Science*, mars 2007, http://bit.ly/PLS353_Rance).

Parce qu'elles sont parfois dangereuses, ces réactions violentes du système immunitaire sont inquiétantes chez les nourrissons. Maria Makrides et ses collègues de l'institut de recherche pour la santé de la mère et de l'enfant, en Australie, ont cherché un moyen de les réduire (*British Medical Journal*, 30 janvier 2012). Ils ont réalisé une étude sur 706 enfants à haut risque héréditaire d'eczéma et d'allergie alimentaire. À partir de la 21^e semaine de gestation de la moitié d'entre eux, les chercheurs ont fourni aux mères des capsules à base d'huile de poisson représentant un supplément quotidien de 900 milligrammes d'acides gras oméga 3. Dans le groupe de contrôle (l'autre moitié), les mères prenaient des capsules à base d'huile végétale.

Les chercheurs ont constaté que le taux d'incidence de l'eczéma a été réduit d'un tiers chez les enfants dont les mères ont eu une alimentation supplémentée en acides gras oméga 3, et que moins d'enfants de ce groupe étaient allergiques à l'œuf. Le suivi des enfants va se poursuivre durant six ans.

→ OCÉANS : DIX MILLIMÈTRES DE PLUS EN SEPT ANS

La hausse du niveau des mers a deux causes principales : la dilatation de l'eau qui se réchauffe pour environ 30 pour cent et la fonte des glaces pour le reste. En 2010, Anny Cazenave du Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiale (LEGOS) à l'Observatoire Midi-Pyrénées, et Étienne Ber-

→ FLÛTE OU COUPE ?

Deux paris dominent en France : celui des buveurs de champagne en coupe et celui des buveurs en flûte. Récemment, Gérard Liger-Belair et ses collègues du Laboratoire d'œnologie de l'Université de Reims expliquaient que tous ont en commun d'apprécier le champagne à cause de la façon dont les bulles de dioxyde de carbone diffusent en éjectant un délicieux aérosol de gouttelettes (voir « Champagne : l'arôme au cœur des bulles », *Pour la Science*, décembre 2011, http://bit.ly/PLS398_Liger-Belair). Toujours avec G. Liger-Belair, une nouvelle équipe de chercheurs vient de mettre en évidence que le flux de dioxyde de carbone est plus important au-dessus d'une flûte qu'au-dessus d'une coupe (*PloS One*, février 2012). Cela est vrai même si le champagne est servi plus frais, alors que la quantité d'alcool présent au-dessus du liquide baisse avec la température. Les buveurs de flûte sont ainsi assurés de ressentir davantage, sous tous les climats, l'agréable aérosol apporté dans la cavité nasale par les bulles de dioxyde de carbone. Pas de doute, le parti des flûtes est celui des buveurs d'élection !



Les images infrarouges révèlent un flux de CO₂ (en bleu et vert suivant l'intensité) plus intense au-dessus d'une flûte (en haut) que d'une coupe.

thier examinaient ces deux facteurs (voir « La montée des océans : Jusqu'où ? » *Pour la Science*, février 2010, http://bit.ly/PLS388_Cazenave), nous apprenant que la montée des mers s'accélère et qu'elle est estimée à $1,7 \pm 0,3$ millimètre depuis 1950. Thomas Jacob, de l'Université du Colorado, et des collègues viennent d'estimer la contribution moyenne de la fonte des glaces à la montée des mers entre 2003 et 2010 : ils trouvent qu'elle était de $1,48 \pm 0,26$ millimètre par an (*Nature*, en ligne, 8 février 2012).

Les chercheurs ont exploité les données fournies par le couple de satellites GRACE lancés en 2002. Ce système détermine la gravité en mesurant par des allers et retours de microsecondes les variations de vitesse et de distance entre deux satellites identiques qui se suivent sur la même orbite polaire, à 220 kilomètres de distance et à 500 kilomètres d'altitude. Ses cartes mensuelles de la gravité terrestre sont 1 000 fois plus précises que ce qui existait auparavant.

Pour étudier l'évolution des masses de glace, les chercheurs ont découpé la surface terrestre recouverte de glaces en 175 zones délimitées géographiquement et

mesurant moins de 100 kilomètres carrés. Ils ont ensuite exploité les données de GRACE pour déterminer l'évolution de leurs masses de glace entre 2003 et 2010.

Ils ont ainsi confirmé des pertes de masse glaciaire considérables en Alaska et notamment en Amérique du Nord et du Sud, en Patagonie, près du pôle Nord, mais faibles par comparaison dans les Alpes, en Scandinavie, en Nouvelle-Zélande, au Caucase, dans l'Himalaya... Le cas du massif himalayen constitue une surprise : les chercheurs relèvent une perte de seulement 4 gigatonnes à comparer aux 55 gigatonnes de glace des estimations précédentes.

Qu'en au Groenland et à l'Antarctique, ils assurent à eux seuls $0,41 \pm 0,08$ millimètre par an de hausse du niveau des mers. La hausse annuelle totale, déterminée à l'aide de satellites altimétriques qui mesurent directement l'altitude moyenne de la mer, est de $1,3 \pm 0,6$ millimètre. Cette valeur est proche du résultat trouvé par gravimétrie avec GRACE à savoir $1,48 \pm 0,26$ millimètre. La différence pourrait provenir d'eaux fondues non encore parvenues dans l'océan.

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

La diversité des semences menacée par la loi

Donner le monopole de la sélection des semences à quelques entreprises entraînera une perte irréversible de diversité.

Pierre-Henri GOUYON

Le 28 novembre 2011, le Parlement français a voté une loi visant à améliorer le contrôle et la traçabilité des semences utilisées, en vue de cultures plus homogènes et productives. Depuis plusieurs décennies déjà, les agriculteurs étaient tenus d'acheter des semences certifiées, mais ressemer ses graines était toléré. La nouvelle loi réglemente cette pratique : pour replanter les graines qu'ils ont récoltées, les agriculteurs doivent s'acquitter d'une taxe auprès des titulaires des certificats d'obtention végétale dont ils utilisent les variétés — en pratique l'industrie semencière. L'échange des semences entre particuliers est, quant à lui, interdit. Nombre d'agriculteurs dénoncent cette loi, perçue comme une atteinte à leur liberté. En fait, son impact est plus profond. En empêchant le brassage génétique des semences dans un contexte d'appauvrissement drastique des ressources génétiques, c'est-à-dire de la diversité des variétés disponibles pour nourrir les hommes, la loi empêche que se développent les processus qui permettraient la remise en route de cette diversité, avec des conséquences graves pour l'agriculture.

Durant des milliers d'années, la domestication des plantes s'est accompagnée d'échanges de gènes entre formes cultivées et sauvages. Puis, lorsque les formes cultivées sont répandues hors de leurs territoires d'origine, chaque cultivateur a sélectionné ses propres semences. Chaque lot avait donc son individualité génétique. La diversité interne à chaque lot a néanmoins été maintenue par les échanges entre paysans. Une immense diversité génétique a été créée par brassage dynamique des gènes.

La situation a changé au XIX^e siècle, lorsque les agriculteurs se sont spécialisés en semenciers d'un côté, et exploitants de l'autre. Les plantes n'ont plus été reproduites que dans les champs des semenciers, les récoltes des autres champs servant à fabriquer aliments ou produits industriels. L'avenir des ressources génétiques est ainsi passé aux mains des seuls sélectionneurs. Cette pratique a certes augmenté la production agricole, les semenciers sélectionnant les plantes les plus rentables : les variétés actuelles de blé, par exemple, favorisent le rendement (qui

90 POUR CENT DES MAÏS PRÉCOCES EUROPÉENS SONT ISSUS DE LA MÊME POPULATION GÉNÉTIQUE.

augmente le rapport grain/paille), la compaction de l'épi (ce qui augmente le nombre et le poids des grains par pied), et la dureté des protéines du grain (qui raccourcit le temps de pétrissage). Toutefois, malgré leur savoir-faire, les semenciers ne pouvaient remplacer le vaste territoire d'évolution représenté par l'ensemble des champs cultivés. D'autant que le nombre d'entreprises semencières n'a depuis cessé de décroître et, avec elles, la diversité des variétés disponibles. Actuellement, 90 pour cent des maïs précoces européens sont issus de la même population génétique et, dans les années 1990, quatre variétés de blé représentaient près de 80 pour cent des surfaces de blé tendre en France.

Une solution pour préserver la diversité des semences a été mise en œuvre : la constitution de banques de semences dans d'immenses enceintes réfrigérées, telle la Réserve

mondiale de semences du Svalbard, un archipel norvégien, inaugurée en 2008. Mais cette stratégie est-elle efficace ? Les graines mises au froid ne sont pas éternelles. Elles finissent par perdre leurs propriétés germinatives. Il faut alors les semer, bien isolées les unes des autres, et récolter leurs descendants pour les remettre au réfrigérateur. Surtout, cette solution repose sur une vision fixiste de la biodiversité. Or la biodiversité est bien plus qu'un liste d'espèces : c'est l'ensemble dynamique des émergences et extinctions produites par les mécanismes de l'hérédité et les interactions avec les autres formes du vivant ou l'environnement. Notamment, une forme de la biodiversité est sa capacité d'adaptation, par les processus de l'évolution, aux changements environnementaux, qu'ils soient climatiques, sociaux ou économiques. Comment retrouver de telles conditions avec une banque de semences figée dans le temps ?

On peut certes faire le pari que la technologie paiera la perte de diversité en cherchant, au coup par coup, les gènes dont on aura besoin pour résoudre telle ou telle difficulté. C'est l'option choisie par les firmes de biotechnologie et suivie par une majorité d'États. Mais une autre voie est possible, qui a fait ses preuves sur de petits territoires expérimentaux : la sélection participative, où chaque agriculteur contribue à la sélection des semences de façon concertée et optimisée. Cette approche suppose bien sûr que chaque agriculteur soit propriétaire de ses semences, et qu'il en échange une partie avec ses voisins.

Plusieurs initiatives de sélection participative ont été lancées dans le monde — avec succès — à partir des années 1970. En France,

un programme de gestion dynamique du blé a débuté en 1984 à l'initiative de l'INA P-G (aujourd'hui AgroParisTech), associant une unité de l'institut national de la recherche agronomique (Moulon) et des lycées agricoles, avec le soutien du ministère de l'Agriculture. Il s'agissait de cultiver et ressemer trois types de populations génétiquement hétérogènes dans 15 lieux répartis sur le territoire, selon deux modes de culture, l'un intensif et l'autre plus durable, avec peu d'engrais et pas de fongicide, afin d'étudier, sur le long terme, l'évolution de ces populations. Régulièrement, des semences d'autres sites étaient introduites afin de simuler la dynamique évolutive. Vingt ans plus tard, les populations obtenues présentaient plus de gènes de résistance aux maladies fongiques et, en quelques générations, des résistances à d'autres maladies ravageuses et multigéniques.

Des centaines d'autres programmes de sélection participative existent dans le monde, soutenus par des organisations telles que l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture et le Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale, visant à mieux utiliser les savoirs des populations locales pour créer *in situ* des variétés adaptées aux différentes régions, en particulier dans les pays en développement.

Par la loi du 28 novembre 2011, l'agriculture française a pris un virage lourd de conséquences pour la diversité des semences, suivant en cela les directives européennes. Avant de se engouffrer dans cette voie, pour autant, un choix scientifique et politique est à faire concernant cette diversité : voulons-nous l'utiliser comme une simple ressource naturelle qui un jour s'épuisera, comme le pétrole, en misant sur le progrès technique

pour élaborer de nouvelles solutions, ou souhaitons-nous la préserver et la rendre pérenne en développant la sélection participative ? Dans cette réflexion, les scientifiques ont leur rôle à jouer en expliquant les enjeux et les solutions en termes simples, concrets, accessibles, pour que les politiques prennent leurs décisions en connaissance de cause. Une chose est sûre : c'est maintenant qu'il faut se poser la question.

Pierre-Henri GOUYON est chercheur au Laboratoire origine, structure et évolution de la biodiversité, UMR 7205 MNHN-CNRS.

P.-H. Gouyon (dir.). Aux origines de l'environnement. Lavoisier, 2011.
Ch. Bonjean et F. Thomas, Genes, pouvoirs et profits, Quilès, 2009.



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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Vers les réseaux électriques intelligents

Les réseaux de distribution d'électricité du futur devront être plus flexibles, afin que la production et la consommation soient optimisées. De multiples versions miniatures de tels réseaux sont testées un peu partout dans le monde.

Yann TANGUY, Céline AUGER et Carolina TRONCETTI

Les réseaux de distribution et de production d'électricité actuels sont dimensionnés pour les heures de pointe, qui ne surviennent qu'à quelques moments dans l'année, par exemple lors des épisodes de grand froid ; le reste du temps, certains équipements sont surdimensionnés. En outre, comme on sait mal stocker l'électricité, les réseaux de distribution seraient déstabilisés par un apport trop important d'électricité issue d'énergies renouvelables intermittentes (éolien, solaire, etc.). Les réseaux de certaines îles, telle la Réunion, petits et isolés, sont particulièrement flexibles, et ont même un fort potentiel éolien et solaire...

Comment pallier ces difficultés ? En donnant plus d'« intelligence », autrement dit plus de flexibilité, aux réseaux. Cela concerne tant la production que la consommation – qu'on cherche à lisser par divers moyens, afin notamment de diminuer les pics. On parle de réseau intelligent ou *smart grid* en anglais. Différents types sont à l'étude, mais l'idée générale est de rendre les équipements plus communicants.

Le projet PREMIO, qui a démarré au début de l'année 2008, est une des premières plateformes expérimentales dans ce domaine. Cofinancé par la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, il est implanté dans trois communes de cette région. Une centrale de pilotage communique avec une cinquantaine de systèmes de production d'électricité, de stockage d'énergie et de délestage (ces derniers soulagent le réseau par des effacements, c'est-à-dire des baisses ponctuelles de la puissance fournie à certains appareils, tels des chauffages électriques ou des lampadaires publics). L'électricité est ainsi produite par une turbine alimentée par un fluide que des capteurs solaires thermiques produisent. Le stockage est par exemple des batteries ou

giles, et ont même un fort potentiel éolien et solaire...
Comment pallier ces difficultés ? En donnant plus d'« intelligence », autrement dit plus de flexibilité, aux réseaux. Cela concerne tant la production que la consommation – qu'on cherche à lisser par divers moyens, afin notamment de diminuer les pics. On parle de réseau intelligent ou *smart grid* en anglais. Différents types sont à l'étude, mais l'idée générale est de rendre les équipements plus communicants.
Le projet PREMIO, qui a démarré au début de l'année 2008, est une des premières plateformes expérimentales dans ce domaine. Cofinancé par la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, il est implanté dans trois communes de cette région. Une centrale de pilotage communique avec une cinquantaine de systèmes de production d'électricité, de stockage d'énergie et de délestage (ces derniers soulagent le réseau par des effacements, c'est-à-dire des baisses ponctuelles de la puissance fournie à certains appareils, tels des chauffages électriques ou des lampadaires publics). L'électricité est ainsi produite par une turbine alimentée par un fluide que des capteurs solaires thermiques produisent. Le stockage est par exemple des batteries ou



→ 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

des ballons d'eau chaude, où de l'énergie de chauffage est mise en réserve (l'électricité alimente les pompes à chaleur). Ces dispositifs sont installés chez des hébergeurs (habitants et bâtiments publics).

La centrale de pilotage reçoit des requêtes pour réduire la consommation ou augmenter la production, puis calcule et transmet des consignes aux systèmes afin qu'ils régulent leur fonctionnement et que l'ensemble réponde aux requêtes. En dehors de leur pilotage par la centrale, certains dispositifs tels des chauffages automatiques, peuvent aussi gérer l'énergie de façon autonome, par exemple en diminuant leur puissance pendant la nuit dans un souci d'économie.

Premio a rencontré plusieurs types de difficultés techniques, d'abord : rendre communicantes des technologies aussi variées s'est révélé compliqué. Sociologiques, ensuite : certains hébergeurs craignaient de ne pouvoir régler le chauffage à leur convenance, notamment lors des épisodes de grand froid.

Malgré cela, le pilotage de tous ces systèmes s'est effectué avec succès, sans dysfonctionnement majeur. Concernant le chauffage, les diminutions ponctuelles de puissance n'ont provoqué que de très faibles baisses de température, grâce à l'inertie thermique des bâtiments. Le fonctionnement de Premio a été prolongé jusqu'à fin 2012 et les résultats sont en cours d'analyse.

L'attitude des consommateurs face aux incitations sera déterminante dans la flexibilité des réseaux intelligents : jusqu'à quel point les habitants accepteront-ils les effacements ? Seront-ils d'accord pour qu'une centrale de pilotage prenne certaines décisions, par exemple celle d'adapter l'heure de démarrage d'un lave-linge ? Les nouveaux démonstrateurs français, tels NICEGRID, REFLEXE et MILLENEO, devraient autoriser des études statistiques et quantitatives sur ces points. Ces démonstrateurs ont démarré en 2011 dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et gèrent chacun environ un million de clients.

De nombreux autres aspects restent à étudier. Certains concernent la sécurité des réseaux et le respect de la vie privée : de multiples données étant collectées sur la consommation des hébergeurs, elles devront être sécurisées et confidentielles. En outre, il faudra s'assurer que les systèmes pilotés à distance ne puissent pas être piratés. Des questions de responsabilité, liées à la façon d'assurer les équipements installés chez

les hébergeurs, se poseront également. Enfin, les différents modèles économiques potentiellement applicables (bonus à l'effacement, tarifications dynamiques du type heures creuses/heures pleines, mais plus flexible...) restent à affiner. Aujourd'hui, les projets de réseaux intelligents se multiplient en France et dans le monde. Chacun analyse une partie des problématiques liées à ces réseaux, qu'elles soient d'ordres technique, sociologique, économique, environnemental, légal ou politique.

LES PROBLÉMATIQUES RENCONTRÉES sont d'ordres technique, sociologique, économique, environnemental, légal et politique

Outre ces projets, des technologies intelligentes sont déjà opérationnelles. Ainsi, des aggregateurs sont apparus (*Energy Pool*, *Voltales*, *Novawatt*...) : il s'agit d'entreprises utilisant divers moyens de contrôle et de communication pour agréger et vendre de la production ou de l'effacement sur les marchés de l'électricité. Les effacements de gros consommateurs industriels sont notamment regroupés en entités virtuelles caractérisées non par une puissance de production mais par une puissance de délestage. Cela permet d'améliorer les prévisions et le lissage des effacements. Même s'il reste de nombreuses difficultés à résoudre, les réseaux intelligents, indispensables à l'exploitation future de grandes quantités d'énergie renouvelables, commencent d'ores et déjà à s'implanter...

Yann TANGUY, de Transénergie, Céline AUGER, de Capénergies, et Carolina TRANCHITA, d'EDF-ENER, sont respectivement responsables de l'évaluation des impacts, chef de projet et directrice technique de Premio (www.projetpremio.fr).

Une suite d'applications scientifiques à la pointe de la technologie !

- Aéronautique
- Agroalimentaire
- Biochimie
- Biologie
- Chimie
- Finance
- Génétique
- Matériaux
- Médecine
- Microbiologie
- Pharmacologie
- Physique
- Psychologie
- Toxicologie
- Zoologie...

Analyse de pics

Ajustement de surfaces

Ajustement de courbes

TableCurve 3D

TableCurve 2D
Automated curve fitting
and equation discovery

PeakFit

AutoSignal

SYSTAT 13

Analyse du signal

Mesure et analyse d'images

Analyse et visualisation
de données scientifiques

Analyse
statistique

Plus d'informations sur :

www.ritime.com/go/systat

RITME Informatique - Distributeur Officiel • 34, bd Haussmann • 75009 Paris • France
Tél. : +33 (0)1 42 46 00 42 • Fax : +33 (0)1 42 46 00 33
info@ritime.com • www.ritime.com



Disponible pour Windows.

Sauf indication contraire : logiciel et documentation en anglais, et livrés par CD-Rom.

© Copyright 2011 RITME. Les produits Systat sont des marques déposées de Systat Software.

Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.

RITME
INFORMATIQUE

Distributeur officiel en France

VRAI OU FAUX

Nos souvenirs sont-ils immuables ?

Non. Pour être mémorisé durablement, un souvenir doit être régulièrement « rejoué ». Au fil des répétitions, il se transforme.

Francis EUSTACHE

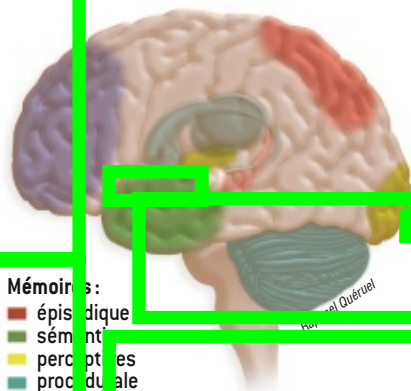
Nos souvenirs connaissent des destins divers : certains ne restent en mémoire que quelques instants, d'autres toute une vie. Comment ces derniers se fixent-ils durablement dans notre cerveau ? Restent-ils fidèles aux événements vécus ?

Avec Béatrice Desgranges, nous avons proposé un modèle de la structure et du fonctionnement de la mémoire, MNESIS, inspiré des théories du psychologue canadien Endel Tulving. Nous supposons une mémoire formée de cinq « systèmes » en interaction : la mémoire de travail (ou mémoire à court terme), la mémoire procédurale (ou mémoire des habitudes), les mémoires perceptives (qui maintiennent des percepts en mémoire, tels des sons ou des images, avant même leur accès au sens), la mémoire sémantique (formée des connaissances générales sur le monde et sur soi) et la mémoire épisodique (qui est celle de nos souvenirs).

Pour être stockée pendant plus de quelques minutes, une information doit passer de la mémoire de travail aux autres systèmes de mémoire. À partir d'une durée de l'ordre d'une journée, soit elle subit des réactivations régulières, marquées par des interactions entre ces systèmes (des composantes perceptives et conceptuelles peuvent être appelées lors de la réactivation d'un souvenir stocké dans la mémoire épisodique), soit elle s'efface. En d'autres termes, les souvenirs qui ne disparaissent pas sont « rejoués », le plus souvent pendant le sommeil. Ce phénomène concerne tous les systèmes de mémoire et se déroule lors de phases de sommeil différentes selon le type d'information : les représentations épi-

sodiques et sémantiques, par exemple, seraient surtout rejouées pendant le sommeil profond.

Lorsqu'un souvenir est réactivé, il est fragilisé et peut subir des changements. Ainsi, les réactivations multiples des traces mnésiques entraînent des modifications graduées dans les connexions entre les régions du cerveau impliquées dans la mémoire. Celle-ci se réorganise alors progressivement.



Mémoires :

- épisodique
- sémantique
- perceptives
- procédurale
- épisodique, sémantique et de travail

LA MÉMOIRE serait composée de cinq systèmes en interaction, situés dans des aires cérébrales diverses (en couleur).

En conséquence, nos souvenirs se transforment au fil du temps et des répétitions : ils perdent en précision et en spécificité, se déforment, voire se superposent si des événements ressemblants se succèdent. On dit qu'ils se sémantisent : on ne se souvient plus d'une fois particulière où l'on a pris le train ni de son cortège d'événements associés, mais seulement de ce que signifie prendre le train

de façon générale. Quelques « vrais » souvenirs épisodiques persistent tout de même parfois très longtemps, mais ils sont placés dans un contexte global reconstruit : ce sont des moments emblématiques, des événements ayant un sens particulier, des situations de danger ou de bonheur intense...

Or mémoire et identité se nourrissent l'une de l'autre. Les souvenirs épisodiques qui conservent une certaine précision constituent des marqueurs de l'identité personnelle. Plus généralement, nous pensons que les représentations identitaires sont forgées sur les interactions de la mémoire épisodique et de la mémoire sémantique (vision du monde et façon de considérer les souvenirs s'influencent mutuellement), mais aussi sur les liens avec les autres systèmes de mémoire, selon des modalités qui restent à préciser.

Une telle conception devrait nous aider à répondre à diverses questions : comment l'identité d'un jeune enfant, dont les systèmes de représentation de « haut niveau » (mémoire épisodique et sémantique) sont loin d'être matures, s'élabore-t-elle ? Comment l'identité est-elle influencée par des pathologies touchant ces systèmes ? À contrario, quelles sont les répercussions sur la mémoire de pathologies atteignant d'abord l'identité, telle la schizophrénie ? Les études scientifiques visant à le découvrir sont en cours...

F. EUSTACHE est directeur d'études à l'École pratique de hautes études (EPHE) et dirige l'unité 1071 de l'INSERM, à l'université de Caen/Basse Normandie.

F. Eustache et B. Desgranges, *Les chemins de la mémoire*, Inserm/Le Point, mai 2010.



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

✓ UN HASARD FORT INUTILE ?

Jean-Paul Delahaye explique dans l'article *L'impossible hasard* (*Pour la Science* n° 413, mars 2012, http://bit.ly/413_delahaye) que ni les algorithmes, ni les objets mathématiques, ni les systèmes physiques macroscopiques ou même quantiques ne produisent du hasard au sens fort, selon la définition de Martin-Löf (incompréhensibilité et imprévisibilité).

Dès lors, à quoi sert un critère qui ne peut être satisfait ? N'est-il pas trop restrictif ?
Philippe Boiteau

→ RÉPONSE DE JEAN-PAUL DELAHAYE

L'article ne dit pas que les suites produites par l'utilisation de la mécanique quantique ne sont pas aléatoires au sens fort, mais seulement qu'il n'est pas prouvé (ni axiomatique) qu'elles le sont. C'est possible, mais on ne peut l'affirmer avec certitude à ce jour.

Par ailleurs, il existe de nombreuses suites mathématiques qui sont aléatoires au sens fort. Les « nombres oméga de Chaitin » en fournissent une infinité. Le critère de Martin-Löf n'est donc pas *a priori* inaccessible.

Le but de l'article était d'insister sur le fait qu'il existe une bonne définition des suites aléatoires, et qu'on ne peut pas en produire aujourd'hui de manière certaine, malgré ce qui est parfois prétendu.

✓ CERTITUDES ÉGYPTIENNES

Selon l'article *Le casse-tête de la chronologie égyptienne* (*Pour la Science* n° 413, mars 2012, http://bit.ly/413_egypte), l'avènement du pharaon Taharqa en 690 avant notre ère est le point de départ de la chronologie égyptienne. Mais comment cette date est-elle connue avec certitude ?

Alfred Rillandier

Savons-nous comment les anciens Égyptiens prononçaient leur langue ? Les noms de pharaons sont-ils supposés retranscrire cette prononciation ?

Didier Nord

→ RÉPONSE DE NADINE GUILHOU

(Institut d'égyptologie, Univ. Montpellier 3)

On peut dater la date du règne de Taharqa par rapport aux dates romaines bien connues, à partir des informations de plusieurs documents. Le papyrus Louvre 7848 permet d'abord de fixer le début de la 26^e dynastie à -663. En effet, il indique une date de calendrier solaire et en calendrier lunaire en l'an 12 du règne d'Amasis, date qui correspond à -59. Une stèle d'Apis (Louvre IM 3733) permet ensuite de remonter à -690, qui est la date d'accès au trône de Taharqa. L'an 1 de Taharqa est ainsi compris entre le 12 février -690 et le 11 février -589 du calendrier julien. C'est pour l'instant la date limite de la chronologie absolue. À mesure que l'on s'éloigne dans le temps, les marges d'erreur augmentent.

Cependant, la prononciation, un ensemble d'indices, laisse penser que nous prononçons l'égyptien ancien de façon relativement proche de ce qu'il a dû être la réalité.

Premièrement, l'égyptien, comme l'arabe et les langues sémitiques, ne note que les consonnes. Dans la transcription latine, le *h* note le *ayn* arabe, le *a* note le *aleph* des langues sémitiques ; le *w* pour les anglophones) le *waw*, et le *i, j* ou le *yod*. Ce ne sont pas des voyelles, mais des semi-consonnes. Le *kh* note une gutturale (voisine de la *jota* espagnole ou du *h* aspiré).

Ainsi, Toutankhamon ne se prononce pas avec un *k*, mais avec une gutturale. La plupart du temps, nous ignorons la vocalisation des mots, puisque les voyelles ne sont pas notées. Nous ajoutons entre les consonnes des *e* muets ou accentués. Cela explique les différences entre les transcriptions francophones, anglophones, etc., les plus proches de la réalité étant les arabophones.

Par ailleurs, nous connaissons parfois une prononciation approchée du mot égyptien par le grec. Cependant, la transcription peut être postérieure de plusieurs siècles à l'origine du mot, dont la prononciation a pu évoluer. Nous avons gardé par exemple le nom grec du pharaon Thoutmésis, alors que ce dernier est nommé en égyptien Djehouty-mès : Djehouty avait sans doute une prononciation proche de Thot/Thout (un des dieux égyptiens) à l'époque grecque. La vocali-

sation de certains mots est aussi connue *via* le copte. Ainsi *st-hmt*, « femme », se prononçait « srimê ».

Enfin, au Nouvel Empire, beaucoup de mots étrangers ont été transcrits en écriture « internationale », unéiforme, pour lesquels les scribes égyptiens ont mis au point un alphabet syllabique. Ce procédé concerne surtout des mots d'origine étrangère, mais a aussi été appliqué à des mots égyptiens.

✓ DES LYMPHOCYTES PLUS SENSIBLES

Alice Lebreton et ses collègues écrivent dans *Les multiples stratégies de Listeria* (*Pour la Science* n° 412, février 2012, http://bit.ly/pls412_listeria) que les lymphocytes T cytotoxiques détruisent spécifiquement les cellules infectées par *Listeria*, mais que la bactérie s'en protège grâce à une protéine qu'elle produit à sa surface, la listériolysine, qui déclenche l'apoptose de ces lymphocytes. Pourquoi la listériolysine entraîne-t-elle la mort des lymphocytes et pas celle

des cellules infectées par *Listeria* ?
Georges Vasselisse

→ RÉPONSE D'ALICE LEBRETON

La listériolysine peut aussi déclencher la mort d'autres types de cellules. En culture, l'apoptose lors de l'infection par *Listeria* a été rapportée pour des cellules de type neuronal et des cellules dendritiques. *In vivo*, les hépatocytes, notamment, peuvent être touchés. De façon générale, une infection à long terme de cellules par *Listeria* s'achève par la mort cellulaire, mais pas toujours avec la même rapidité.

Peut-être certains types cellulaires, tels les lymphocytes T cytotoxiques, sont-ils plus sensibles que d'autres à l'apoptose induite par la listériolysine. Peut-être *Listeria* protège-t-elle les cellules qu'elle colonise plus facilement, telles les cellules épithéliales, contre une apoptose trop rapide, afin de ménager sa niche. Les données manquent encore pour conclure, surtout *in vivo*, où les proportions relatives de cellules infectées de chaque type restent mal connues.

puf

POUR LA
SCIENCE



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 31 mai 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 31 mai 2012.

RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES
ET INSCRIPTIONS

Site internet : www.lemonde.fr/prix-recherche/
Email : prixrecherche@lemonde.fr

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 ».

Le Monde

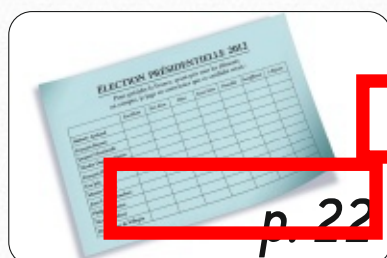
Google

FONDATION
CREDIT COOPÉRATIF
FONDATION D'ENTREPRISE



Fondation Charles Léopold Mayer
pour le Progrès de l'Homme

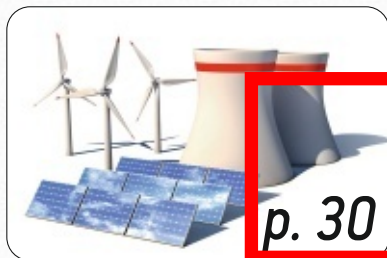
Science & élections



p. 22

Ne votez pas, jugez !

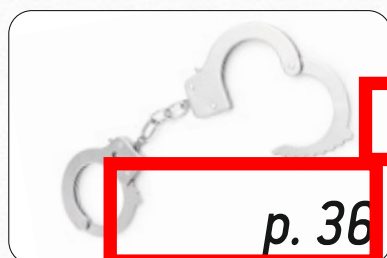
Michel Balinski et Rida Laraki



p. 30

**Choix énergétiques :
un débat biaisé**

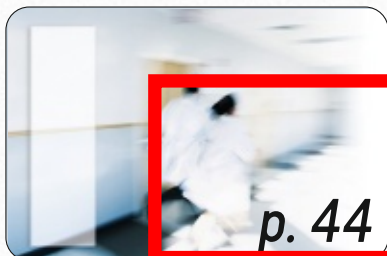
Benjamin Dessus



p. 36

**Politiques de sécurité,
quelle efficacité ?**

Sebastian Roché



p. 44

**Définir un nouveau système
de santé : une urgence**

André Grimaldi et Olivier Lyon-Caen

Les scientifiques s'invitent dans les débats

Il nous faut trouver des alternatives aux énergies fossiles, et la catastrophe de Fukushima a renforcé le doute sur l'usage à long terme et sans risque de l'énergie nucléaire. Mais la France peut-elle sortir du nucléaire ?

Notre système de santé a longtemps été considéré comme l'un des meilleurs en termes d'accès aux soins, de qualité de la prise en charge et de l'augmentation de l'espérance de vie. Mais étant donné la façon dont il évolue depuis plusieurs années, pourra-t-il continuer à assurer un accès à des soins de qualité pour tous ?

Pour lutter contre la délinquance, diverses mesures, telles la vidéosurveillance ou les mesures répressives, ont été renforcées. Sont-elles efficaces ? Diverses études internationales ont établi que les caméras installées dans les rues sont sans effet, mais aussi que certaines psychothérapies sont efficaces pour éviter les récidives. Ne serait-il pas temps d'appliquer en France ce qui donne de bons résultats dans d'autres pays ?

Le système électoral est parfois contesté, surtout quand il permet à un candidat dont les Français ne veulent pas de figurer au second tour des élections présidentielles, comme ce fut le cas le 21 avril 2002. Existe-t-il une autre façon de choisir celui ou celle qui doit représenter le peuple selon ses préférences ?

Pour fournir aux débats politiques des données fiables, la rédaction a choisi d'aborder ces quatre thèmes en demandant à des scientifiques de faire un état des lieux de leur domaine, d'identifier les difficultés auxquelles chacun est confronté et de suggérer quelques pistes de réflexion.

Aujourd'hui, personne n'a de solution incontestable à proposer. Si des scientifiques feront sans doute des constats proches d'une situation donnée, ils n'auront pas les mêmes analyses quant aux causes et aux moyens à mettre en œuvre. Mais leurs réponses permettent d'alimenter des débats que beaucoup appellent de leurs vœux.

Ne votez pas, JUGEZ !

Michel Balinski et Rida Laraki

Le scrutin majoritaire usuel souffre de graves défauts.

Un mode de scrutin nommé jugement majoritaire, qui consiste

à évaluer tous les candidats à une élection selon une grille de valeurs

commune, éviterait ces écueils et respecterait l'opinion de l'électorat.

Juste avant le premier tour de l'élection présidentielle de 2002, un article du numéro d'avril de *Pour la Science* commençait par cette question prémonitrice : « Si, en ce printemps 2002, les urnes désignent pour président un candidat autre que celui réellement voulu par les électeurs ? » Le 21 avril 2002 allait amplement confirmer cette prédiction. Et dix ans plus tard, avec au moins quatre candidats à la présidence de la République qui pourraient recueillir le 22 avril prochain des pourcentages importants de voix –, cette question est toujours d'actualité.

Mais, contrairement à 2002, il existe aujourd'hui une solution. Un nouveau mode de scrutin, le jugement majoritaire, issu d'une nouvelle théorie de vote, permettrait d'éviter les multiples écueils du scrutin majoritaire en usage et d'assurer l'élection du candidat considéré le meilleur par la majorité du corps électoral. Voyons comment et pourquoi.

Le scrutin majoritaire à deux tours tel qu'il est pratiqué en France semble simple, direct et démocratique, sûr d'exprimer le choix des électeurs. Mais l'élection présidentielle de 2002 suffit à démontrer que ce mode de scrutin est une illusion confectionnée par l'habitude – ne répond

pas à ses exigences. En 2002, Lionel Jospin avait été éliminé au premier tour avec 16,2 % des voix, devancé de peu par Jean-Marie Le Pen (16,9 %). Mais sans la candidature de Christiane Taubira (2,3 %) ou de Jean-Pierre Chevènement (5,3 %), qui ont dispersé les voix de la gauche, Lionel Jospin aurait probablement été qualifié pour le second tour, et selon plusieurs sondages aurait pu gagner contre Jacques Chirac. Ainsi, le scrutin majoritaire souffre du paradoxe de l'Arrow, du nom du prix Nobel d'économie Kenneth Arrow : le vainqueur du scrutin dépend de la présence ou de l'absence de « petits » candidats n'ayant aucune chance de gagner.

Outre que ce paradoxe trahit la volonté des électeurs, il engendre un jeu politique nuisible : susciter des candidatures dont le rôle est de nuire à l'adversaire, tout en en dissuadant d'autres de peur qu'elles nuisent à son propre camp. Et que doit faire l'électeur ? Voter « selon son cœur » pour le candidat qui représente le mieux ses opinions, ou « voter utile », c'est-à-dire faire un choix stratégique pour assurer la présence au second tour d'un candidat qui n'est pas son premier choix, avec de surcroît le risque d'avoir mal calculé et de le regretter ?

Au second tour de l'élection présidentielle de 2002, Jacques Chirac avait écrasé Jean-Marie Le Pen par un score soviétique de 82,2 % des voix, devenant ainsi le président le mieux élu de la V^e République. Pour autant, a-t-il suscité une adhésion massive, bien supérieure à tout autre président. Évidemment non. Le vrai sens de ce score était un rejet massif du candidat du Front national.

Le scrutin usuel trahit les électeurs

Ainsi, dans le scrutin majoritaire à deux tours, les votes exprimés ne mesurent en rien l'opinion réelle des électeurs. Jacques Chirac était arrivé en tête du premier tour avec 19,9 % des suffrages, score qui ne correspond en rien aux 82,2 % obtenus au second tour. La deuxième position atteinte par Jean-Marie Le Pen au premier tour ne reflète en rien le rejet massif de ses idées exprimé au second tour. Et le fait que les Verts obtiennent régulièrement moins de 5 % des voix aux élections présidentielles ne reflète en rien l'adhésion de la population aux idées écologistes.

Ce dysfonctionnement du scrutin majoritaire n'est pas un accident isolé. Il

ÉLECTION PRÉSIDENTIELLE 2012

Pour présider la France, ayant pris tous les éléments en compte, je juge en conscience que ce candidat serait :

	Excellent	Très bien	Bien	Assez bien	Passable	Insuffisant	à Rejeter
Nathalie Arthaud							
François Bayrou							
Jacques Cheminade							
Nicolas Dupont-Aignan							
François Hollande							
Eva Joly							
Marine Le Pen							
Jean-Luc Mélenchon							
Philippe Poutou							
Nicolas Sarkozy							
Dominique de Villepin							

POUR PARTICIPER À CE SCRUTIN D'UN NOUVEAU TYPE,

le jugement majoritaire, cochez la mention (*Excellent, Très bien, Bien, etc.*) que vous jugez la plus appropriée à chacun des candidats. Selon les auteurs, qui ont élaboré une nouvelle théorie de vote, l'analyse de l'ensemble de tels bulletins permettrait d'élire le candidat qui aurait réellement la préférence des Français.

s'est probablement répété plusieurs fois, de façon plus subtile. Une dizaine de sondages précédant le premier tour de l'élection présidentielle de 2007 montrent que François Bayrou avait été qualifié au second tour, il l'aurait largement emporté contre n'importe quel autre candidat. Les électeurs du candidat principal éliminé – Ségolène Royale ou Nicolas Sarkozy – seraient reportés massivement sur le candidat centriste.

Que faut-il en conclure ? Le système majoritaire à deux tours n'est pas aussi simple qu'il y paraît. Il peut conduire à l'élection d'un président qui ne correspond pas au vœu réel de l'électorat. Il place les électeurs devant un dilemme difficile : voter par calcul stratégique ou voter selon ses préférences ? Il place les petits partis dans l'embarras : doivent-ils présenter un candidat pour défendre leurs idées, au risque de faire éliminer le candidat principal de leur sensibilité politique ? La démocratie est piégée par le système qui est supposé l'incarner ! Et le risque d'un « 22 avril 2012 » similaire au séisme politique du 21 avril 2002 ne peut aujourd'hui être écarté.

Les 6 et 7 avril 2011, le cercle de réflexion politique Form'New a fait réaliser

ser par l'Institut *OpinionWay* un sondage portant sur 991 personnes représentatives, afin d'évaluer les différences entre le scrutin majoritaire à deux tours et le jugement majoritaire. Les données de ce sondage sont évidemment obsolètes, car certains candidats proposés, telle Martine Aubry, n'ont finalement pas été investis, et d'autres, comme Jean-Louis Borloo, se sont retirés. En outre, un sondage n'est qu'une vue instantanée du comportement possible d'un électorat. Cependant, ce sondage constitue une expérience unique qui permet de comparer « en situation réelle » le jugement majoritaire et le scrutin majoritaire, et met en évidence, une fois de plus, les problèmes de ce dernier.

La première question (voir l'encadré pages 26 et 27) portait sur les intentions de vote pour le premier tour des présidentielles de 2012. M. Aubry arrivait en tête avec 21,7 % des intentions de vote, suivie par Marine Le Pen avec 20,6 %, puis N. Sarkozy, crédité de 9,1 %. Le candidat du principal parti de droite éliminé : un 21 avril à l'envers ! Les marges d'incertitudes du sondage, de 2 à 3 %, impliquent que n'importe lequel des trois principaux candidats aurait pu être éliminé, y compris celle ou celui réellement souhaité par les électeurs. Avec quatre

L'ESSENTIEL

✓ Le scrutin majoritaire permet l'élimination de candidats préférés à l'élu, force à voter de façon stratégique et est facile à manipuler.

✓ Pour éviter ces difficultés, il suffit de juger sans choisir ou classer les candidats.

✓ Le jugement majoritaire consiste à attribuer des mentions à chaque candidat, puis à calculer pour chacun la mention soutenue par la majorité.

✓ Le jugement majoritaire incite à voter de façon honnête, permet l'expression d'opinions complexes, et réconcilie le vote utile et le vote du cœur.

LES AUTEURS

Michel BALINSKI et Rida LARAKI, chercheurs au CNRS et au Laboratoire d'économétrie de l'École polytechnique, à Palaiseau, ont développé la théorie du jugement majoritaire.

✓ SUR LE WEB

Conférence de M. Balinski et R. Laraki, Le jugement majoritaire : une nouvelle théorie du vote Collège de France, 29 février 2012.
<http://www.college-de-france.fr/site/pierre-rosanvallon/audio-video.asp>

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Balinski et R. Laraki, *Majority Judgment: Measuring, Ranking, and Electing*, MIT Press, 2010.

M. Balinski, *Le scrutin*, *Pour la Science*, n° 294, pp. 46-51, avril 2002.

Terra Nova, *Rendre les élections aux électeurs : le jugement majoritaire*, Note, 21 avril 2011.
<http://www.tnova.fr/note/rendre-les-lecons-aux-lecteurs-le-jugement-majoritaire>

candidats atteignant plus de 10% des voix, la situation serait encore plus confuse...

La deuxième question portait sur les intentions de vote au second tour, pour trois duels possibles: M. Aubry contre M. Le Pen, N. Sarkozy contre M. Le Pen, et M. Aubry contre N. Sarkozy. Dans les deux premiers cas, M. Le Pen aurait été écrasée au second tour, que ce soit par M. Aubry ou N. Sarkozy (voir l'encadré page 28). Cependant, à l'encontre du bon sens, elle était classée en seconde position à l'issue du premier tour (voire en première position, compte tenu des marges d'erreur)!

Les paradoxes du vote

Les défaillances du scrutin majoritaire sont connues depuis la Révolution française et les travaux pionniers du chevalier de Borda et du marquis de Condorcet. Borda présenta en 1770 à l'Académie des sciences un exemple devenu célèbre (voir l'encadré ci-dessous). Trois candidats A, B et C sont en lice, et l'on obtient la situation paradoxale suivante: C est éliminé au premier tour, B gagne contre A au second, mais C est en fait préféré à A et à B par les électeurs! Le paradoxe d'Arrow se manifeste ici une fois encore: si le perdant du second tour (A) n'était pas candidat, alors C aurait battu B.

« D'où l'on voit, remarqua Borda, que pour qu'une forme d'élection soit bonne, il faut qu'elle donne aux électeurs le moyen de [se] prononcer sur le même

aux mérites de chacun de ses concurrents. » Et Condorcet précisa « que chaque électeur prononça son vœu complet par un jugement comparatif entre tous les candidats pris deux à deux ».

Borda et Condorcet avaient bien identifié la source des difficultés. Voter pour un seul candidat parmi plusieurs ne suffit pas à mesurer les opinions des électeurs. Pour cela, il faut plus d'informations. Il y en a dans l'exemple de Borda. Les ordres de préférence des électeurs – desquels découlent leurs préférences entre les candidats pris deux à deux, comme l'évoque Condorcet – permettent de déduire qu'un candidat peut gagner à la majorité face à tout autre candidat. On parle alors de « gagnant de Condorcet ». Comme évoqué, les sondages suggèrent que F. Bayrou était le gagnant de Condorcet en 2007.

Dans certaines élections, cependant, il n'y a pas de gagnant de Condorcet. C'est le paradoxe de Condorcet. Avec des ordres de préférences répartis un peu différemment et comparé à l'exemple de Borda, on arrive à une situation où A bat C, C bat B, et B bat A, tous largement. Il n'y a aucun gagnant!

Peut-on sortir de cette impasse? En d'autres termes, existe-t-il un mode de scrutin qui désigne toujours un gagnant – il évite le paradoxe de Condorcet –, qui ne dépende pas de la présence ou de l'absence de candidats mineurs – il évite le paradoxe d'Arrow – et qui assure l'éga-

LES PARADOXES D'ARROW ET DE CONDORCET

Dès la fin du XVIII^e siècle, le chevalier de Borda et le marquis de Condorcet ont mis au jour certains points faibles du scrutin majoritaire. Dans l'exemple proposé par Borda en 1770 (a), trois candidats A, B, et C sont en lice. Les votants doivent classer les candidats par ordre de préférence: 5 % choisissent l'ordre A, B, C; 34 % l'ordre A, C, B; 32 % l'ordre B, C, A; 29 % l'ordre C, B, A. Au premier tour, avec 39 % des voix, A devance B (32 %) et C (29 %). Au second tour, C est éliminé et B gagne contre A avec 61 % (32 % + 29 %) des voix. Et pourtant, C est préféré à A par 69 % (34 % + 35 %) des électeurs et à B par 63 % (34 % + 29 %). C'est le paradoxe d'Arrow: si le perdant A n'était pas candidat, B gagnerait contre C.

Condorcet a mis en évidence un autre paradoxe: dans certaines configurations, aucun candidat ne gagne face à tout autre. Dans ce

cas, A écrase B (55 % + 34 % = 89 %) et B écrase C (34 % + 29 % = 63 %) et B bat A (32 % + 29 % = 61 %). Il n'y a pas de gagnant.

Un autre exemple, non plus théorique, mais concret, illustre le paradoxe d'Arrow: l'élection présidentielle aux États-Unis en 2000 (c). Elle opposa George W. Bush, Albert Gore et Ralph Nader. G.W. Bush fut élu président avec les voix de 211 grands électeurs contre 251 pour A. Gore. En Floride, G.W. Bush eut 537 voix de plus que A. Gore, ce qui lui donna les 25 voix des grands électeurs de cet État.

Malgré cela, il est irréfutable que l'immense majorité de ceux qui avaient voté pour R. Nader – un candidat sans aucune chance d'être élu –

la candidature de R. Nader, A. Gore aurait été élu avec 291 voix de grands électeurs contre 246 pour G.W. Bush.

a) Exemple de Borda				
% des électeurs	A	B	C	
5 %	1 ^{er}	2 ^e	3 ^e	
34 %	1 ^{er}	3 ^e	2 ^e	
32 %	2 ^e	1 ^{er}	3 ^e	
29 %	3 ^e	2 ^e	1 ^{er}	
Total	39 %	61 %	29 %	
b) Exemple de Condorcet				
% des électeurs	A	B	C	
5 %	1 ^{er}	2 ^e	3 ^e	
34 %	1 ^{er}	3 ^e	2 ^e	
32 %	2 ^e	1 ^{er}	3 ^e	
29 %	3 ^e	2 ^e	1 ^{er}	
Total	39 %	61 %	29 %	
c) Élection présidentielle aux États-Unis				
	Fla.	Grands	États-Unis	Grands
Votes	Électeurs	Votes	Électeurs	
G. Bush	2 912 790	25	50 456 002	271
A. Gore	2 912 253	0	50 999 897	266
R. Nader	97 488	0	2 882 955	0

Malheureusement, K. Arrow a démontré dans les années 1950 que lorsque les opinions des électeurs sont exprimées par des ordres de préférence comparant les candidats entre eux, aucun mode de scrutin ne peut garantir ces trois propriétés. Ce théorème a engendré l'idée qu'il n'existe pas de mode de scrutin idéal, laissant aux politiciens le choix du *statu quo*. Or choisir un président est un acte sérieux et, en conséquence, déduire l'opinion collective des opinions diverses des électeurs est un problème de très haute importance. Que faire ?

Juger les candidats sans les comparer

Initialement, Borda et Condorcet avaient pourtant visé juste : il faut juger les candidats. Mais il ne faut pas les comparer ! Pour sortir des paradoxes, l'électeur doit évaluer le mérite de chacun des candidats selon une échelle de mentions, et seules ces mentions peuvent déterminer le classement des candidats. Bien sûr, un ordre comparatif entre les candidats peut être déduit des mentions allouées par un électeur, mais la nouvelle théorie démontre qu'il faut l'ignorer (voir l'encadré ci-contre).

Le jugement majoritaire ne demande pas à l'électeur d'ordonner tous les candidats du « meilleur » au « pire », ce qui est une tâche difficile et exprime mal ses opinions. Au contraire, il lui demande de les évaluer un par un – une tâche facile qui lui donne bien plus de latitude pour s'exprimer pleinement – selon une échelle commune de mentions : *Excellent*, *Très bien*, *Bien*, *Assez bien*, *Passable*, *Insuffisant*, à *Rejeter*.

À la suite des deux premières questions, le sondage d'avril 2011 précédemment évoqué proposait de juger l'ensemble des candidats selon ce système (voir l'encadré pages 26 et 27). L'électeur devait attribuer une mention parmi les sept possibles à chaque candidat. Le décompte des bulletins donne une appréciation précise de la valeur de chaque candidat. M. Aubry a par exemple obtenu la distribution suivante : *Excellent* : 8,2 % ; *Très bien* : 12,9 % ; *Bien* : 17,0 % ; *Assez bien* : 12,6 % ; *Passable* : 19,6 % ; *Insuffisant* : 11,4 % ; à *Rejeter* : 18,4 %. Par conséquent, les 21,7 % d'intentions de vote qu'elle obtenait au premier tour dans le scrutin majoritaire prennent un sens nouveau : ils correspondent pour l'essentiel à la somme des appréciations *Excellent* et *Très bien*.

Par ailleurs, des informations intéressantes se dégagent. Par exemple, les

UNE REFORMULATION DU CONCEPT DE MAJORITÉ

Soient deux candidats A et B. Les électeurs doivent les valuer en leur attribuant les mentions *Excellent*, *Bien* ou *Passable*. Dans le premier cas (a), 10 % des électeurs ont voté pour A et B *Bien*. Il faut alors supposer qu'avec le scrutin majoritaire, ces 10 % voteraient pour A et pas pour B. Avec 5 % (10 % + 31 % + 16 %) des voix dans le premier cas, et B gagnerait contre A avec 53 % (5 % + 5 % + 23 %) dans le second (b).

Mais pour l'électeur, la mention *Passable* est la même que la mention *Excellent*. Comme le montre le deuxième cas, même avec deux candidats, le scrutin majoritaire peut être mis en défaut.

Candidat	10 %	31 %	15 %	16 %	15 %	13 %
A	Excellent	Excellent	Bien	Bien	Passable	Passable
B	Bien	Passable	Excellent	Passable	Excellent	Bien

Candidat	41 %	21 %	6 %	5 %	23 %
A	Excellent	Bien	Bien	Passable	Passable
B	Passable	Excellent	Passable	Excellent	Bien

	Excellent	Bien	Passable
A	41 %	21 %	29 %
B	30 %	23 %	47 %

trois quarts des participants n'accordent la mention *Excellent* à aucun candidat. Un cinquième d'entre eux les jugent tous au plus *Passable*. En moyenne, un électeur rejette un tiers des candidats. Enfin, deux électeurs sur cinq attribuent leur meilleure mention à plusieurs candidats.

Des tendances semblables ont été observées dans toutes les utilisations du jugement majoritaire. Notez qu'elles ne peuvent s'exprimer lorsque chaque votant désigne un seul candidat ou établit son propre ordre de classement. Le scrutin majoritaire force l'électeur à choisir un seul candidat quand il hésite entre plusieurs, et l'approche de Borda et de Condorcet implique d'ordonner les candidats, alors que les opinions des électeurs sont plus subtiles.

La mention majoritaire

Comment le vainqueur du jugement majoritaire est-il déterminé ? Le scrutin se déroule en un seul tour. On déduit des mentions obtenues par chaque candidat son résultat final, sa « mention majoritaire », puis, à partir des mentions majoritaires de tous les candidats, on calcule le classement final, ou classement majoritaire. Le mode de calcul n'est pas arbitraire : il est imposé par des

On constate que dans les deux cas, A obtient 41 % de mentions *Excellent*, 31 % de mentions *Bien* et 29 % de mentions *Passable*. De même, B obtient 30 % de mentions *Excellent*, 23 % de mentions *Bien* et 47 % de mentions *Passable*. Les distributions des mentions sont identiques dans les deux cas !

Par conséquent, il est évident que le candidat A doit l'emporter quand les électeurs s'expriment pleinement. Mais dans le second cas, B obtient 53 % de mentions *Passable*. Comme le montre le deuxième cas, même avec deux candidats, le scrutin majoritaire peut être mis en défaut.

argument théoriques pour satisfaire à plusieurs propriétés souhaitées, notamment inciter l'électeur à s'exprimer honnêtement et contrecarrer les tentatives de manipulation.

La mention majoritaire est par définition celle qui est soutenue par une majorité contre toute autre mention. En d'autres termes, une majorité des votants pensent que le candidat vaut au moins cette mention et au plus une majorité pensent qu'il vaut au plus cette mention.

Naturellement, un candidat ayant une mention majoritaire meilleure qu'un autre est mieux classé. Mais avec 12 candidats et seulement 7 mentions, il y aura des candidats ayant la même mention majoritaire. La théorie impose une règle pour les départager : l'idée est simple. Imaginez les mentions d'un candidat ordonnées des meilleures aux pires sur une balance (elles ont toutes le même poids). La mention majoritaire du candidat est située au point d'équilibre de la balance (c'est la médiane des mentions). Si le pourcentage des mentions situées au-dessus de sa mention majoritaire est supérieur au pourcentage situé au-dessous, le fléau de la balance penche du côté positif, autrement il penche du côté négatif. De deux candidats ayant la même mention majoritaire positive, celle ou celui

ayant le pourcentage de mentions supérieures à la mention majoritaire le plus important est le mieux classé. Symétriquement, de ceux ayant la même mention majoritaire négative, celle ou celui ayant le pourcentage de mentions inférieures à la mention majoritaire le plus important est le moins bien classé.

Le jugement majoritaire fait apparaître des résultats différents et plus subtils que ceux du scrutin majoritaire. Dans le sondage d'avril 2011, M. Aubry semble talonnée de près par M. Le Pen et N. Sarkozy au premier tour du scrutin majoritaire. Cependant, avec le jugement majoritaire, il est manifeste qu'elle les domine : elle obtient la mention majoritaire *Assez bien* -, contre respectivement à *Rejeter* et *Insuffisant* +. En outre, elle a beaucoup plus de mentions *Excellent* et *Très bien*, et moins de *Rejeter*. À l'inverse, M. Le Pen est deuxième dans le scrutin majoritaire, mais dans le jugement majoritaire, elle est dernière, car une large majorité la rejette. Les candidats de droite modérés, Jean-Louis Borloo (*Passable* +) et de Dominique de Villepin (*Passable* +), très largement devancés par N. Sarkozy et M. Le Pen dans le scrutin majoritaire, apparaissent en fait plus appréciés par l'électorat. Ainsi, le jugement majoritaire

est un bien meilleur révélateur des opinions réelles.

Un vote honnête

De surcroît, le jugement majoritaire incite à l'honnêteté et permet à l'électeur de voter selon son cœur tout en votant utile. Il rend caduques les consignes de vote et les sur- ou sous-évaluations manifestes. Par exemple, M. Aubry gagne avec la mention majoritaire *Assez bien*. Les électeurs qui la jugent *Bien* pourraient être tentés d'exagérer leur jugement et la hausser en lui attribuant la mention *Excellent*. Cela n'influerait pas sur son classement, car ce qui compte pour l'attribution de sa mention, c'est le nombre d'électeurs qui jugent qu'elle vaut plus qu'*Assez bien*. Or il reste identique. De même, ceux qui la jugent pire qu'*Assez bien* ne modifieront pas le résultat en attribuant une mention arbitrairement basse. Dans la mesure où exagérer ses mentions à la hausse ou à la baisse n'a aucun effet sur le résultat, il est plus raisonnable pour ces électeurs de voter honnêtement.

D'autres manipulations stratégiques sont inapplicables. Des électeurs qui jugent J.-L. Borloo meilleur que M. Aubry pourraient-ils le faire gagner en diminuant les

celles de J.-L. Borloo ? Un électeur ne peut pas à la fois baisser M. Aubry et hisser J.-L. Borloo : seuls ceux qui jugent J.-L. Borloo *Passable* ou moins peuvent espérer le faire augmenter, mais alors ils doivent évaluer M. Aubry moins que *Passable*. Or remplacer certaines de ses mentions *Insuffisant* par des *Rejeter* ne baissera pas le classement de M. Aubry, car son pourcentage de mentions au-dessous de sa mention majoritaire restera le même.

Symétriquement, seuls ceux qui jugent M. Aubry *Assez bien* ou plus peuvent espérer la faire baisser, mais alors ils doivent évaluer J.-L. Borloo plus qu'*Assez bien*. Or remplacer certaines de ses mentions *Bien* ou plus par des mentions supérieures n'augmentera pas le classement de J.-L. Borloo, car son pourcentage de mentions au-dessus de sa mention majoritaire restera le même. Donc, s'il n'est pas impossible de hisser J.-L. Borloo au-dessus de M. Aubry en forçant son vote, cela reste difficile et peu probable. De façon générale, des arguments théoriques et différentes expérimentations montrent que le jugement majoritaire incite à l'honnêteté et résiste à la manipulation mieux que toute autre méthode connue.

Le jugement majoritaire n'a-t-il aucun point faible ? Certains lui reprochent par-

L'APPLICATION DU JUGEMENT MAJORITAIRE

Le jugement majoritaire consiste à demander à l'électeur d'évaluer chacun des candidats, au lieu de voter pour un seul d'entre eux. Les candidats sont évalués selon une échelle commune comportant sept mentions : *Excellent*, *Très bien*, *Bien*, *Assez bien*, *Passable*, *Insuffisant* et à *Rejeter*. Chaque électeur doit attribuer une mention et une seule à chacun des candidats. Pour le faire, il coche sur le bulletin la case adéquate correspondant à la mention choisie. Les lignes blanches sont comptabilisées comme à *Rejeter*. Le scrutin se déroule en un seul tour.

Le sondage réalisé selon ce principe en avril 2011 proposait aux 991 participants de voter pour l'élection présidentielle de 2012 le jugement majoritaire. Douze candidats étaient proposés. La répartition des mentions résultante est indiquée sur le tableau de la page ci-contre.

Pour déterminer le vainqueur du scrutin, on déduit d'abord pour chaque candidat sa « mention majoritaire » (la mention la plus fréquente des mentions de tous les candidats, on calcule le « classement majoritaire ». La mention majoritaire est celle qui est soutenue par la majorité des élec-

teurs contre toute autre mention. En d'autres termes, 50 % des votants au moins pensent que le candidat a cette mention ou plus, et moins de 50 % pensent qu'il vaut une mention strictement supérieure. Par exemple, la mention majoritaire de J.-L. Borloo est *Passable*, car 65,6 % des électeurs jugent qu'il mérite au moins la mention *Passable* (2,2 % *Excellent* + 6,2 % *Très bien* + 15,3 % *Bien* + 22,3 % *Assez bien* + 19,6 % *Passable*). Mais toute mention supérieure n'est soutenue que par une minorité. Symétriquement, 54,0 % (11,1 % + 15,3 % + 18,5 % + 19,6 % + 35,5 %) jugent qu'il mérite au plus la mention *Passable*, mais toute mention inférieure n'est soutenue que par une minorité.

La mention majoritaire est complétée d'un « + » si le pourcentage de mentions meilleures qu'elle est supérieur au pourcentage de mentions moins bonnes. Dans le cas contraire, elle est complétée d'un « - ». La mention majoritaire de J.-L. Borloo est ainsi *Passable* +, car 46 % (2,2 % + 6,2 % + 15,3 % + 22,3 %) des mentions sont meilleures que *Passable*, et seulement 34,4 % (15,9 % + 18,5 %) sont moins bonnes que *Passable*.

Le classement majoritaire est ensuite déterminé par l'ordre de classement des mentions majoritaires.

1. Un candidat ayant une mention majoritaire plus élevée qu'un autre est placé devant celui-ci (N. Sarkozy devant E. Joly).
2. Une mention majoritaire avec un « + » est devant une même mention avec un « - » (F. Bayrou devant E. Joly).
3. Si deux candidats ont la même mention majoritaire « + », celui ayant le plus grand pourcentage de mentions meilleures est placé devant l'autre (J.-L. Borloo, avec 46,0 % de votes meilleurs que *Passable*, devance D. de Villepin, avec 40,1 %).
4. De façon symétrique, si deux candidats ont la même mention majoritaire « - », celui ayant le plus grand pourcentage des mentions moins bonnes est derrière l'autre (J.-L. Mélenchon devance O. Le Pennot).

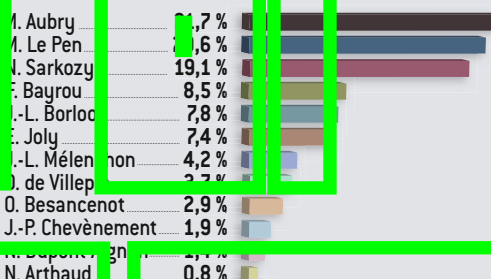
L'ordre du tableau ci-contre indique le classement majoritaire résultant de l'expérimentation. La mention majoritaire d'un candidat est notée au centre de ses mentions – la médiane.

(Sur le tableau, les chiffres sont arrondis, de sorte que les sommes ne correspondent pas toujours à 100 %.)

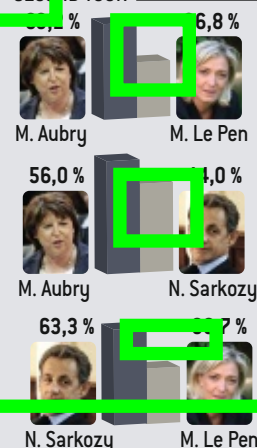
Un sondage a été réalisé en avril 2011 sur un échantillon représentatif de 991 personnes sur le thème « Si la présidentielle de 2012 se déroulait au jugement majoritaire ». La première question portait sur les intentions de vote des participants. On voit (*ci-contre*) que Martin Aubry arrivait en tête du premier tour, devant Marine Le Pen. Nicolas Sarkozy était éliminé ! Les marges d'incertitudes de 2 à 3 % impliquent que le candidat favori de lequel de ces trois candidats aurait pu être éliminé. La deuxième question concernait le second tour, en

proposant des duels entre les trois candidats au premier tour. Les réponses (*ci-contre*) montrent sans ambiguïté que M. Le Pen aurait été écrasé par M. Aubry ou par N. Sarkozy. Mais à l'encontre de la position au premier tour ! Le scrutin majoritaire peut éliminer un candidat qui est préféré à un autre.

PREMIER TOUR



SECOND TOUR



on voit dans l'expérimentation d'avril 2011 que M. Aubry gagne largement, alors qu'elle se situe à la gauche du Parti socialiste. Elle est en outre suivie par deux candidats certes modérés, mais appartenant (à l'époque) à l'UMP.

D'autres expériences (notamment une simulation du jugement majoritaire dans plusieurs bureaux de vote lors de l'élection présidentielle de 2007) et diverses études théoriques ont conclu que le jugement majoritaire n'avantage ni ne désavantage les principaux partis de droite, de gauche ou du centre et qu'il diminue notablement l'influence des extrêmes qui provoquent un fort sentiment de rejet. Par comparaison, le scrutin majoritaire à deux tours élimine le centre, avantage fortement les grands partis de droite ou de gauche, et donne trop d'importance aux extrêmes.

Certains chercheurs et blogueurs proposent d'évaluer les mérites des candidats selon une échelle de notes (de 0 à 20, ou de 0 à 100, voire avec 0 ou 1), puis de les classer selon la moyenne de leurs notes (ou celle qui est équivalente, la somme de leurs notes). Mais la moyenne souffre de trois défauts majeurs.

Premièrement, elle est propice à la manipulation. Un petit groupe d'électeurs peut avoir un impact important sur le résultat du vote en faisant fi de leur appréciation réelle pour attribuer la note maximale à leur favori et la minimale aux autres, ce qui modifie la moyenne des notes. Le jugement majoritaire a été conçu précisément pour combattre une telle tricherie.

Deuxièmement, théorie et expériences montrent que plus l'échelle de notes est étendue, plus ces méthodes sont biaisées en faveur du centre. Imaginez le bulletin de jugement majoritaire – comme il a été imaginé par des blogueurs – où chaque *Excellent* attribue 6 points au candidat, chaque *Très bien* 5 points et ainsi de suite jusqu'à *Rejeter* 0 point. Les principaux candidats de gauche ou de droite auraient beaucoup de 3, 5 et peu de 0, 1, et 6. En conséquence le candidat de droite ou de gauche pourrait avoir une moyenne d'environ 3, mais une majorité pour au moins *Bien* (ou 4) et le candidat du centre une moyenne d'environ 4, mais une majorité seulement pour *Assez bien* (ou 3). Ainsi, avec la moyenne, le centriste devancerait le candidat de droite ou de gauche, contredisant la voix de la majorité.

Enfin, il ne faut pas oublier qu'une élection mesure le soutien accordé à chaque candidat, et élit celle ou celui qui est le plus soutenu. Mesurer le mérite avec une échelle de 0 et 1, ou de 0, 1 et 2, ne suffit pas. Utiliser une échelle dont le sens des notes n'est pas compris par l'électorat ne peut que donner des résultats nébuleux. Mais même s'il existe une échelle bien comprise de tous (ce qui impliquerait six ou sept notes), rien ne justifie un classement des candidats selon les moyennes de leurs notes. Selon la théorie de la mesure, une moyenne a un sens seulement quand 1 point indique la même augmentation quelle que soit sa position sur l'échelle. Ainsi, 1 °C de plus correspond à la même augmentation de chaleur de 8 °C à 9 °C que de 22 à 23 °C. C'est manifestement faux sur une échelle numérique de mérite : passer de 19 à 20 (ou de *Très bien* à *Excellent*) est bien plus difficile et plus rare que de passer de 11 à 12 (ou de *Passable* à *Assez bien*). De telles moyennes sont donc pourvues de toute signification.

de *Passable* à *Assez bien*). De telles moyennes sont donc pourvues de toute signification.

Réformer le scrutin

Le jugement majoritaire remplace un vote majoritaire sur les candidats eux-mêmes par un vote majoritaire sur leurs mérites. Peut-il effectuer ce changement ? Le scrutin majoritaire présente des inconvénients : il empêche les électeurs de s'exprimer librement, les force à voter de façon stratégique, donne trop d'importance aux extrêmes, élimine systématiquement le centre, ne mesure mal les poids des forces politiques et ne garantit pas l'élection du candidat jugé le meilleur par l'électorat. Cela ne concerne pas seulement l'élection présidentielle mais toutes les élections : législatives, cantonales, etc. – où un candidat doit être choisi parmi d'autres, que ce soit en France ou ailleurs.

En revanche, le jugement majoritaire désigne le candidat jugé le plus méritant par la majorité de l'électorat et évite les principaux défauts du scrutin majoritaire. Il rend inutile le jeu des candidatures multiples, réalise l'économie d'un tour, mesure avec précision le mérite attribué à chaque candidat par l'électorat, traduit fidèlement le sentiment des votants, limite les possibilités de manipulation et incite les électeurs à l'honnêteté en faisant coïncider le vote « utile » et le vote « du cœur ».

En outre, le jugement majoritaire permet une évolution pacifique par les urnes. Aucun candidat n'est jugé *Passable* ou plus ? Alors l'électorat les refuse tous et exige une autre élection avec d'autres candidats.

DES GIGA OCTETS DE CULTURE SCIENTIFIQUE À VOTRE DISPOSITION !



ABONNEZ-VOUS

12 n°s • 56 €

au lieu de 74,50 € (prix de vente au numéro)

soit 25 % de réduction !



BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement à : Service Abonnements • Pour la Science • 8, rue Férou • 75278 Paris cedex 06

POUR LA
SCIENCE

☐ Oui, je m'abonne au magazine *Pour la Science* :

☐ 1 an • 12 n°s • 56 €

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

☐ 2 ans • 24 numéros • 106 € au lieu de 149,80 €

Tarif valable

Pour 20 € de plus, découvrez *Dossier Pour la Science* tous les trimestres !

☐ Oui, je préfère m'abonner à *Pour la Science* (12 n°s/an) + *Dossier Pour la Science* (4 n°s/an)

☐ 1 an • 32 numéros • 143 €

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

☐ 2 ans • 32 numéros • 143 € au lieu de 204,40 €

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-Mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 34 € – autres pays 72 €.

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ ville : _____

Pays : _____

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

_____ @ _____

Je choisis mon mode de règlement :

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

☐ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____

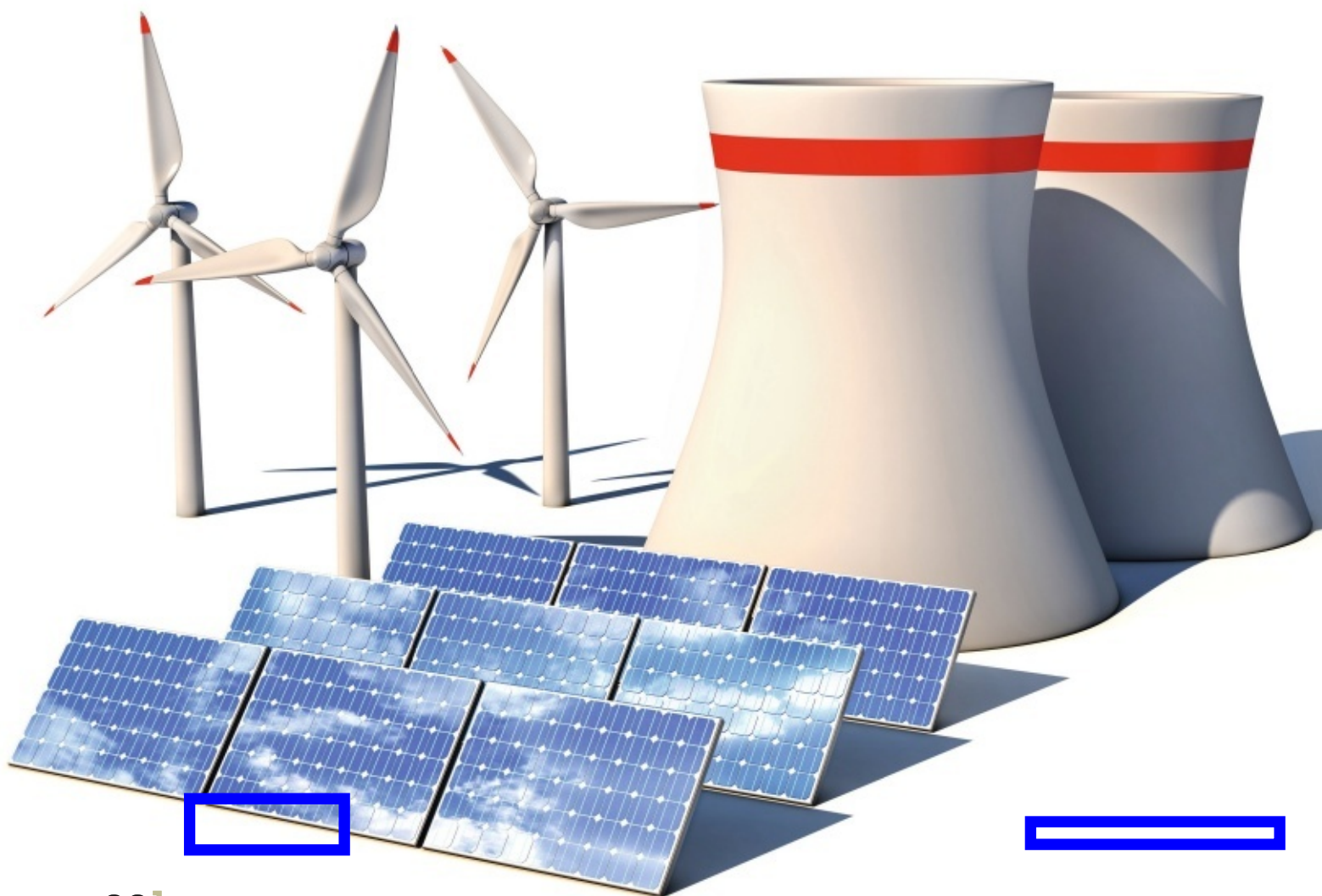
Signature obligatoire

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification au *Pour la Science*. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ☐.

Choix énergétiques : un débat biaisé

Benjamin Dessus

En France, les discussions des politiques énergétiques se bornent à traiter de la part du nucléaire dans la production d'électricité. De plus, elles omettent l'importance des économies possibles d'électricité, et d'énergie en général.



P our la première fois en France, un débat sur l'énergie s'est glissé dans la campagne pour l'élection présidentielle. Dès son début, en octobre 2011. Ce n'est pas trop tôt. Depuis 40 ans, de nombreux scientifiques soulèvent avec insistance mais dans le désert, d'importantes questions non résolues quant à la production d'électricité par des centrales nucléaires : la possibilité d'un accident nucléaire majeur en Europe, la gestion des déchets radioactifs à vie longue, les risques de prolifération des armements nucléaires. Le secteur électronucléaire a en effet la particularité unique de créer, en même temps que de l'énergie utilisable, une série de produits radioactifs qui présentent des dangers majeurs et à très long terme.

Qu'est-ce qui a modifié la donne ? Les bons résultats aux élections européennes et régionales du parti *Europe Écologie* n'y sont pas pour rien, mais l'émergence du débat tient surtout au choc de l'opinion française devant l'accident nucléaire majeur de Fukushima, survenu dans un pays comparable au nôtre. Consciente de l'enjeu électoral, la majorité politique actuelle a engagé dès le printemps 2011 deux initiatives : une étude sur les coûts passés et futurs de la filière électronucléaire, confiée à la Cour des comptes, et la mise en place par le ministre de l'Industrie d'une « Commission Énergies 2050 » censée éclairer l'avenir énergétique de la France à long terme.

Sans attendre les résultats de ces divers travaux, le débat s'est introduit dans la campagne électorale, dès la « primaire » socialiste, à travers la question du nucléaire. C'est une bonne nouvelle, puisque les discussions atteignent enfin la place publique et qu'elles ont incité la plupart des candidats à la présidentielle à prendre position – même si cela a révélé l'incompétence, dans ce domaine, de nombre d'intervenants et la duplicité de certains autres.

Il faut cependant souligner que la question du nucléaire n'est qu'une partie d'une question beaucoup plus vaste : celle de la « transition énergétique », une modification du système énergétique dans sa globalité qui s'impose aujourd'hui. Car l'enjeu est à la fois de permettre à tous les pays d'accéder à un niveau de développ-

ement équivalent à celui des sociétés industrialisées, de restreindre au mieux nos ponctions de ressources fossiles d'énergie (pétrole, gaz, charbon) et de diviser par deux les émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂) avant 2050, le tout sans faire de paris technologiques ni prendre des risques environnementaux inconsidérés. Hélas, les questions environnementales, qui étaient sur le devant de la scène politique et médiatique au temps du « Grenelle de l'environnement », préoccupent beaucoup moins aujourd'hui nos gouvernements. Les derniers, dans un contexte de crise économique et financière, ont ainsi tacitement renoncé à l'ambition de maintenir le réchauffement planétaire au-dessous de deux degrés.

En France, persiste chez les élites politiques et médiatiques une malencontreuse et double simplification : celle qui consiste à assimiler les questions énergétiques aux seules questions de production, et la production d'énergie à la production d'électricité. Or pour y voir plus clair, ces trois thèmes sont à distinguer soigneusement. Il s'agit de penser l'énergie non plus seulement en termes de « mix de production » (les proportions de telle ou telle forme d'énergie dans la production totale d'énergie), mais en termes systémiques. Expliquons ce que cela signifie, après quoi nous présenterons et discuterons quelques-uns des scénarios énergétiques.

La demande en énergie, un levier trop souvent oublié

Un système énergétique a pour fonction de mettre à la disposition d'une société donnée les services requérant de l'énergie, nécessaires aux besoins de l'ensemble de ses membres : alimentation, logement, éducation, santé, culture, mobilité, etc. Le décrire, c'est donc expliciter l'ensemble des liens entre ces besoins très divers et les ressources énergétiques, également très diverses, dont peut disposer cette société.

L'optimisation économique, sociale et environnementale du système énergétique, sous diverses contraintes (ressources, effet de serre, risques d'accidents, déchets), suppose d'accorder autant d'importance à la

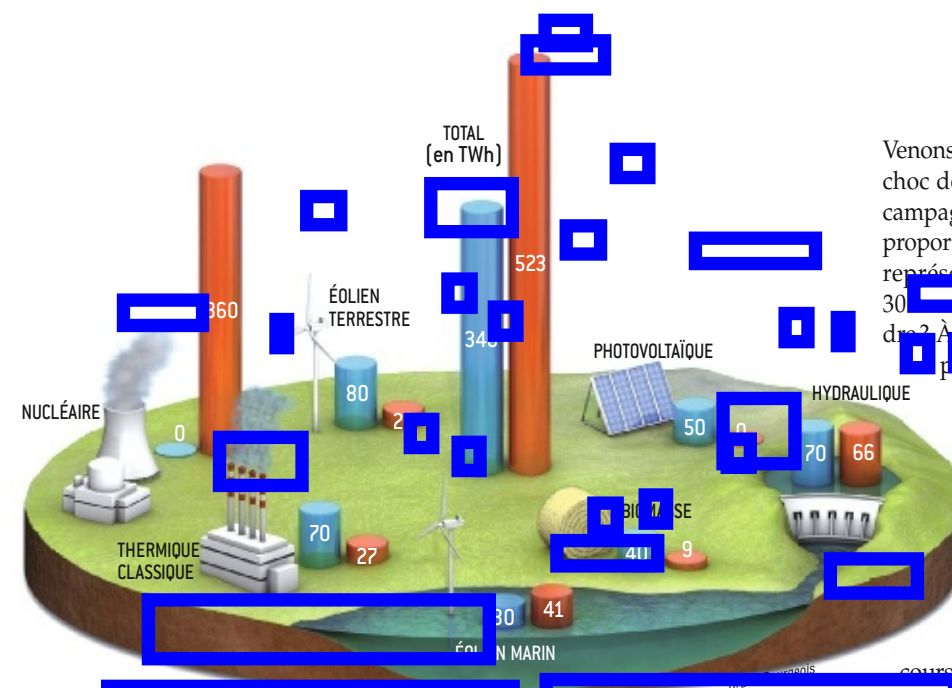
L'ESSENTIEL

✓ Le débat public sur l'énergie n'a fait son apparition en France qu'il y a quelques mois, à l'occasion de la campagne pour les élections présidentielles. Selon l'auteur, il est biaisé par deux grandes omissions.

✓ D'une part, ce débat se focalise sur la production d'électricité, alors que l'électricité ne représente qu'un quart de l'énergie consommée. D'autre part, il ignore le rôle capital que peuvent jouer les économies d'électricité.

✓ Avec une politique volontariste d'économies d'électricité, divers scénarios pourraient être réalistes, dont celui de l'abandon de la filière électronucléaire d'ici 2030.

© Shutterstock/kovaleva79



■ Scénario « Sortie du nucléaire en 2031 »
 ■ Scénario « EPR 2031 »

1. LA PRODUCTION TOTALE D'ÉLECTRICITÉ

en 2031 et la répartition selon son origine, d'après le scénario « Sortie du nucléaire en 2031 » (en bleu) et d'après le scénario « EPR 2031 » (en rouge). Les valeurs sont en térawattheures (1 TWh = 10⁹ kWh).

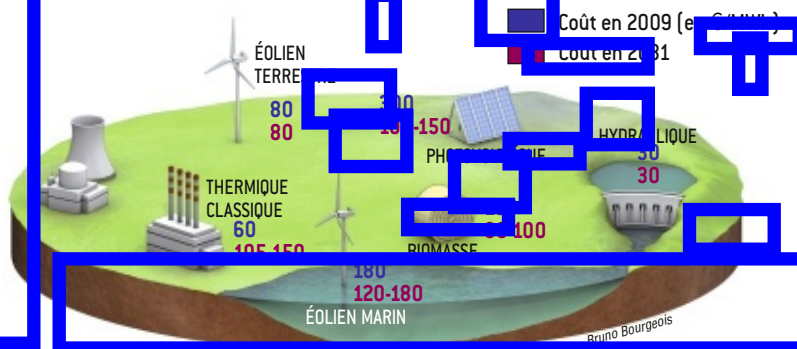
maîtrise de la demande d'énergie qu'à celle de l'offre d'énergie. Or, comme on le fait trop souvent dans notre pays, en réduisant la question de l'énergie à celle de l'offre, on se prive de marges de manœuvre considérables. En effet, comparée à une augmentation de la production d'énergie, une limitation des besoins en énergie est souvent bien plus rentable économiquement pour la collectivité et les individus, plus juste socialement et plus sensée sur le plan de la protection de l'environnement.

Au niveau mondial, l'affaire semble entendue. Même l'Agence internationale de l'énergie (AIE), instance qu'on ne peut pas soupçonner d'être antinucléaire ou de militer en faveur de la décroissance, ne compte plus sur la seule augmentation de la production d'énergie pour assurer un accès aux services énergétiques pour tous sans catastrophe climatique. En témoigne son scénario « 450 ppm de CO₂ », censé permettre à l'humanité d'éviter une grave crise climatique (en limitant la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone à 450 parties par million). Il repose sur l'adoption d'une dizaine de grandes mesures où les efforts sur la maîtrise de la demande d'énergie et l'efficacité énergétique représentent 54 % du total. L'effort total de réduction des émissions de gaz à effet de

serre, loin devant les énergies renouvelables (21 pour cent) ou le captage, stockage du CO₂ dans le sous-sol, et très loin devant le nucléaire, lequel ne contribue que pour six pour cent au résultat.

La transition énergétique, avec ses exigences d'égalité d'accès aux services de l'énergie pour tous et l'indispensable prise en compte des limites physiques de notre planète, repose pour une bonne moitié sur la maîtrise de la demande d'énergie. Et pendant ce temps, le débat en France se focalise sur l'évolution du mix de production d'électricité... On note le grand décalage entre le débat français et la véritable problématique de l'énergie, décalage d'autant plus criant que l'électricité ne représente que 5 pour cent de la consommation totale d'énergie des Français – lesquels, comparés à leurs voisins, font un usage immodéré de l'électricité!

Ces évidences trop souvent oubliées mériteraient d'être rappelées et soulignées.



2. LES FOURCHETTES DE COÛTS

vraisemblables pour les différentes filières de production électrique en 2031, hors nucléaire, en euros par mégawattheure. Le coût prévu pour le thermique classique tient compte d'une taxe sur le CO₂ de l'ordre de 100 dollars (80 euros) par tonne.

Venons-en au débat français qui, après le choc de Fukushima, s'est limité dans la campagne électorale à la question : quelle proportion de l'électricité produite devrait représenter le nucléaire dans les 20 ou 30 prochaines années, et comment l'atteindre? À l'exception notable des écologistes, tous les partis proposent des objectifs chiffrés en pourcentages du total de production d'électricité : maintien d'une proportion de nucléaire supérieure à 70 pour cent pour la majorité actuelle, repli à 50 pour cent en 2025 pour le Parti socialiste, etc.

De façon significative, les discours ne mentionnent jamais les quantités d'électricité auxquelles s'appliquent ces parts de marché. La France consommera-t-elle annuellement 500 térawattheures en 2030 comme aujourd'hui, ou 688 comme le proposent certains, ou encore 350 comme le proposent d'autres? Et pour quoi faire?

Quels scénarios pour l'électricité?

Dès juin 2011, notre association *Global Chance*, pressentant que l'essentiel du débat français porterait sur la question d'une sortie du nucléaire à terme, publiait une première note de comparaison de deux scénarios très contrastés, en termes à la fois de besoins d'électricité et de mix de production.

Dans le premier scénario, on suppose la poursuite des tendances actuelles. Le besoin d'électricité pour la France en 2031 y est estimé à 523 térawattheures (il était de 516 térawattheures en 2009).

avec un recours au nucléaire identique à celui que nous connaissons, sauf que des centrales de type EPR

se substituent avant 2031 au parc actuel, jugé trop onéreux.

Le second scénario fait l'hypothèse d'une sortie du nucléaire et d'une politique volontariste d'économies d'électricité, en particulier dans les secteurs résidentiel et tertiaire. Ces économies reposent sur deux piliers principaux. D'une part, il s'agit d'augmenter l'efficacité des appareils électriques (électroménager, audiovisuel, éclairage, froid, etc.), qui représentent plus des deux tiers de la consommation électrique des secteurs résidentiel et tertiaire ; d'importantes réductions de la consommation d'électricité sont ainsi possibles, et à faible coût. Ils s'agit d'autre part de supprimer progressivement le chauffage électrique à effet Joule, au profit de pompes à chaleur ou d'autres combustibles (bois, gaz naturel).

Dans le second scénario, le besoin d'électricité tomberait alors à 340 térawattheures en 2030. La production d'électricité, en l'absence complète de nucléaire, serait assurée par de l'électricité d'origine renouvelable et, très partiellement, par des turbines à gaz naturel (voir la figure 7).

Depuis l'automne 2011, sont apparus de nombreuses notes ou scénarios, principalement élaborés par des groupes proches des producteurs d'électricité ou de l'industrie nucléaire (UFE, AREVA, CEA, RTE), qui mettent en scène des visions contrastées du mix électrique français et en discutent les vertus et les faiblesses. Seule l'Association *négaWatt*, publiée à cette époque un scénario énergétique complet, qui ne se limite pas à l'électricité mais inclut toutes les autres demandes et offres d'énergie.

Les scénarios autres que ceux de *négaWatt* et de *Global Chance* ont une caractéristique commune : la demande d'électricité y constitue une donnée externe qui, dans la plupart des cas, est au moins aussi élevée qu'en 2010. Les économies possibles d'électricité y sont donc ignorées. Seule l'UFE (Union française de l'électricité) justifie cette position, mais à partir de considérations financières qui donnent des résultats étonnés (voir l'encadré page 35).

La Commission Énergies 2050 s'est focalisée sur la comparaison de ces scénarios, sans chercher à en évaluer la cohérence interne et les limites. Elle est ainsi

L'AUTEUR



Benjamin DESSUS, ingénieur et économiste, préside l'association *Global Chance*, composée de scientifiques s'intéressant aux enjeux environnementaux et prônant un développement mondial équilibré.

Ce que coûte et coûtera l'électricité d'origine nucléaire

Le coût de l'électricité produite par le parc nucléaire français actuel, largement amorti puisqu'il a en moyenne 26 ans, est selon la Cour des comptes de 49 euros par mégawattheure, supérieur de 15 pour cent au coût officiel (42 euros). Mais les opérations de mise à niveau de la sûreté des réacteurs, indispensables à très court terme, et les opérations de jeunesse nécessaires en cas de pourcentage important de parc au-delà de 40 ans amènent la Cour à relever ce coût autour de 55 euros par mégawattheure.

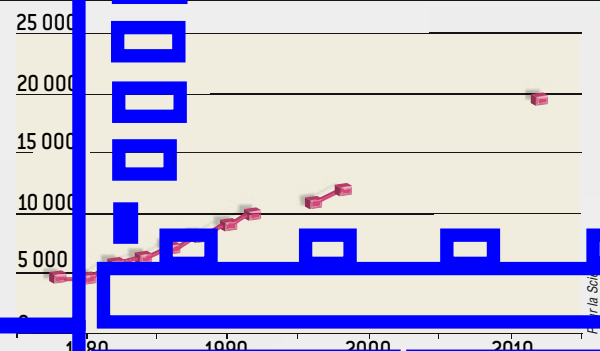
La Cour signale cependant que ce coût est très sensible au coût réel des investissements post-Fukushima ; l'estimation de ce dernier lui apparaît comme minimale et ne prend en compte qu'une infime partie de l'assurance (quelques pour mille) contre un éventuel accident grave ou majeur qui pourrait compromettre tout le parc de réacteurs anciens, dont les cœurs et les bâtiments.

Il est bien sûr très difficile d'estimer à la fois la probabilité d'un tel

accident et le montant des dégâts. Sur les bases historiques d'occurrence d'accidents majeurs de réacteurs que nous avons constatés depuis 30 ans dans le monde (quatre accidents pour 470 réacteurs), l'indemnisation des 100 milliards d'euros de dégâts consécutifs à un accident majeur sur le parc français demanderait, pour constituer la cagnotte nécessaire, d'y affecter de l'ordre de 125 milliards d'euros par mégawattheure, tout au long de la durée de vie restante du parc.

Bien entendu, on peut espérer, mais sans en être sûr, que les probabilités d'accident en France soient très inférieures aux occurrences historiques mondiales. Mais, d'un autre côté, on sait qu'un accident tel que celui de Fukushima coûtera beaucoup plus cher (100 milliards d'euros) que les trois réacteurs de Fukushima (l'IRS prévoit de l'ordre de 600 milliards d'euros pour les trois réacteurs de Fukushima).

Compte tenu des incertitudes nombreuses que signale la Cour, de s'attendre à un coût de l'ordre de



Évolution du coût d'investissement (en francs constants par kilowatt), de la filière électronucléaire française au cours de son histoire.

60 euros par mégawattheure pour le parc de réacteurs actuel, si l'on souhaite, et si l'on peut, sans prise de risque trop importants) en prolonger la durée de vie de 10 à 20 ans.

En ce qui concerne la nouvelle génération de réacteurs PWR (les EPR) dont le coût d'investissement est beaucoup plus élevé que le parc ancien (370 euros par kilowatt contre

pour le parc actuel), la Cour situe le coût du mégawattheure des premiers réacteurs dans une fourchette

allant de 70 à 90 euros. Ce calcul ne tient pas compte d'un effet (à la baisse) du apprentissage industriel éventuel pour les réacteurs suivants, qui d'ailleurs ne s'est pas produit historiquement (voir le graphique ci-dessus). À l'inverse, le calcul n'intègre aucun surcoût dû au renforcement des exigences de sûreté consécutives à l'accident de Fukushima,

risque d'accident majeur. Il semble donc raisonnable de maintenir cette fourchette de coûts.

✓ BIBLIOGRAPHIE

Les coûts de la filière électronucléaire, rapport de la Cour des comptes, janvier 2012 (disponible sur www.ccomptes.fr/fr/CC/Thematiques/290.html)

B. Dessus et B. Laponche, En finir avec le nucléaire, pourquoi et comment, Seuil, 2011.

World Energy Outlook, Agence internationale de l'énergie, 2009 (rapport téléchargeable sur www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/Weo2009.pdf).

J. M. Charpiat, B. Dessus et R. Pellat, Étude économique prospective de la filière électrique nucléaire, rapport au Premier ministre Lionel Jospin, La Documentation française, 2000 (www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/004001472/0000.pdf).

Études de l'association Global Chance : www.global-chance.org

tombée dans le travers d'une confusion entre « système énergétique » et « mix électrique » en 2050, sans analyser ce qui détermine les demandes nationales d'énergie ou d'électricité.

La confusion entre optimisation du système électrique et optimisation du mix de production électrique a des conséquences importantes sur les résultats économiques des comparaisons. Dans le paradigme du « mix », on est tout naturellement conduit à donner un poids essentiel (aux côtés de critères physiques ou techniques, comme l'intermittence ou les émissions de CO₂ mises en jeu) aux coûts de production du kilowattheure pour chacune des filières. La facture des ménages comme celle de la collectivité s'en déduisent aisément, les divergences des scénarios sur la demande électrique étant marginales.

nucléaire est bien plus difficile. En effet, il n'existe pas de marché international du nucléaire qui permettrait d'établir des coûts sur des bases statistiques sérieuses. Il faut donc se fonder sur des données nationales, qui sont très peu transparentes. C'est cette question controversée du coût actuel et futur de la filière électronucléaire que la Cour des comptes vient d'analyser, dans un rapport remis au Premier ministre le 31 janvier 2012. Les chiffres obtenus par cette autorité indiquent un coût actuel de production d'environ 50 euros par mégawattheure, qui devrait notablement augmenter dans le futur (voir l'encadré page 33).

Dans l'esprit de la plupart des décideurs, on dispose dès lors de l'ensemble des données permettant de comparer le coût unitaire des différentes filières de production d'électricité, et donc celui des factures électriques, en tenant éventuellement compte des spécificités des réseaux de transport et de l'électricité associés aux différents scénarios des réseaux intelligents d'électricité ou *smart grids*, par exemple, voir page 15 dans ce numéro). Il en est de même pour les investissements à consentir.

Sur ces bases, il devient assez facile de classer les scénarios par ordre de mérite économique décroissant. C'est à cet exercice que la Commission Énergies 2050 s'est livrée. Elle a distingué trois grandes options. La première est de ne rien faire ou presque : se contenter de remettre aux normes les centrales nucléaires actuelles pour prolonger au maximum leur durée de vie, si possible à 60 ans (ce qui revient à accepter le risque d'un accident majeur). On évite ainsi à la fois d'avoir à construire un nouveau parc nucléaire, et on laisse à nos petits-enfants plutôt qu'à nous ou à nos enfants la délicate question du démantèlement, dont on sait qu'il va coûter cher, sans que l'on soit en mesure de préciser la note.

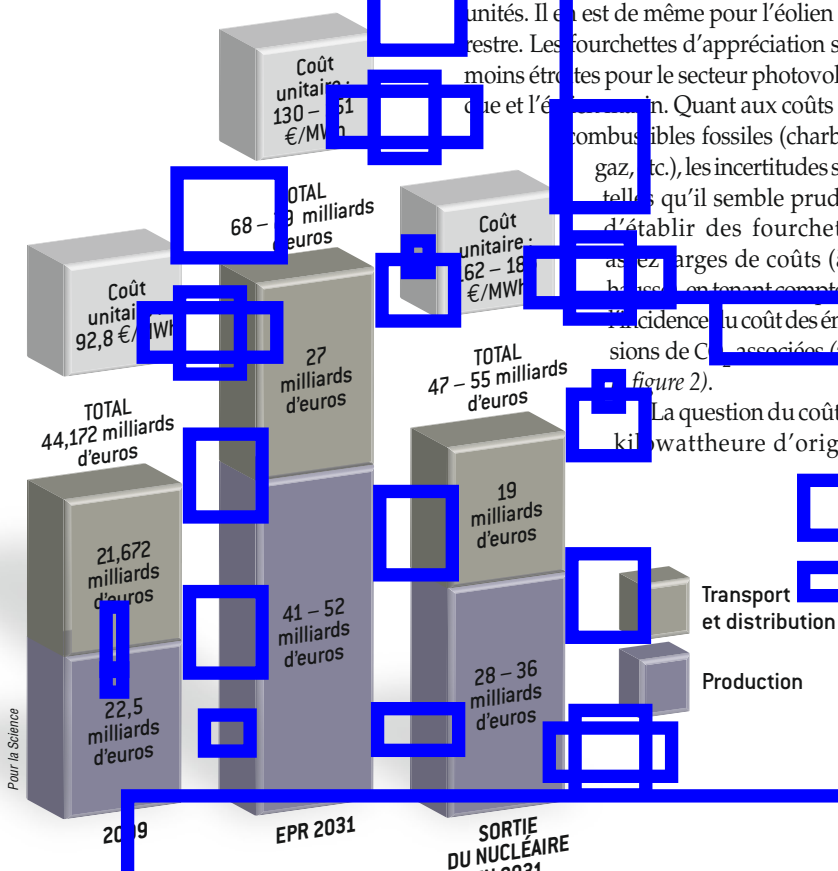
La deuxième option considérée par la Commission Énergies 2050 est de remplacer le parc actuel à la fin de sa durée de vie par un parc de réacteurs de type EPR, réputés beaucoup plus sûrs. Enfin, la troisième option consiste à remplacer le parc actuel par des solutions à énergies renouvelables, complétées éventuellement par de l'électricité d'origine fossile.

La Commission Énergies 2050 conclut que la première option – ne rien faire ou presque – est celle qui coûte le moins cher. Ce n'est guère étonnant, puisque l'écart de coût entre le nucléaire ancien renouvelé (autour de 50 euros par mégawattheure

Le nucléaire, un coût difficile à estimer

Pour la plupart des filières de production d'électricité arrivées à maturité, on connaît assez bien les coûts d'investissement des unités. Il en est de même pour l'éolien terrestre. Les fourchettes d'appréciation sont moins étroites pour le secteur photovoltaïque et l'énergie solaire. Quant aux coûts des combustibles fossiles (charbon, gaz, etc.), les incertitudes sont telles qu'il semble prudent d'établir des fourchettes assez larges de coûts (à la hausse, en tenant compte de l'incidence du coût des émissions de CO₂ associées (voir figure 2).

La question du coût du kilowattheure d'origine



3. COMPARAISON DES FACTURES annuelles hors taxes, pour l'ensemble des usagers, de la production d'électricité en France. L'année 2009 est ici comparée à l'année 2031 pour les deux scénarios considérés par l'association Global Chance.

Le calcul des coûts des économies d'électricité

Pour estimer l'intérêt d'un investissement d'économie d'énergie, la méthode la plus classique consiste à calculer un temps de retour de l'investissement, temps au bout duquel le surinvestissement dû au choix d'un appareil de meilleure qualité est remboursé par les économies financières associées aux économies d'énergie réalisées.

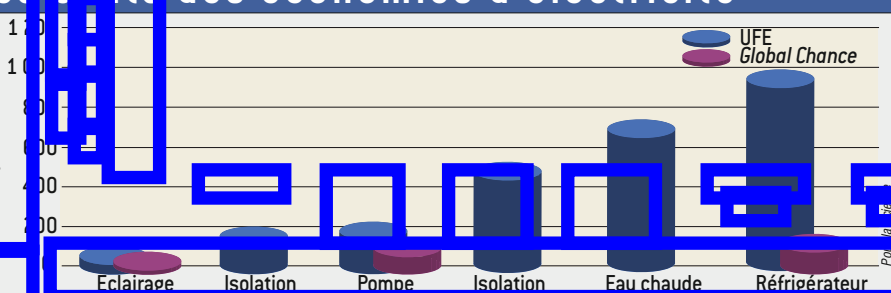
Prenons l'exemple d'un réfrigérateur haut de gamme (classe A++) dont le surcoût, par rapport au réfrigérateur standard (classe A), est de 100 euros, mais qui permet d'économiser 100 kWh par an, avec un tarif d'électricité de 13 centimes par kWh. Le temps de retour du surinvestissement est de $100 / (100 \times 0,13) = 7,7$ ans.

Il existe une autre méthode de calcul, qui fait appel à la notion de « cumul actualisé des économies d'énergie » au cours de la durée de vie de l'appareil investi. L'introduction d'une préférence pour le présent

Coût d'investissement en euros par MWh cumac)

Classement par ordre de mérite économique de quelques mesures d'économie d'électricité selon l'UFE et selon Global Chance.

par rapport au futur peut être traduite par le choix d'un taux d'actualisation. Un taux de 10 pour cent est choisi par un acteur économique, ce qui fait qu'il lui est équivalent de disposer aujourd'hui d'un euro ou d'un an de $1/(1,10)$ euro, ou dans deux ans de $1/(1,10)^2$ euro, etc. Dans cette logique, on calcule le cumul actualisé des économies an-



perdus par rapport au futur peut être traduite par le choix d'un taux d'actualisation. Un taux de 10 pour cent est choisi par un acteur économique, ce qui fait qu'il lui est équivalent de disposer aujourd'hui d'un euro ou d'un an de $1/(1,10)$ euro, ou dans deux ans de $1/(1,10)^2$ euro, etc. Dans cette logique, on calcule le cumul actualisé des économies an-

tuales, soit 120 euros par MWh cumac, ou 12 centimes par kWh cumac. Dans ce cas, la comparaison de la valeur obtenue plus haut et qui ne correspond pas aux coûts constatés sur le marché actuel.

selon son estimation) et les solutions à envisager (énergies renouvelables ou les réacteurs EPR) valent de 25 à 40 euros par mégawatt-heure selon les méthodes.

Mais l'étude de la Commission ne va pas plus loin: pas d'analyse des factures globales annuelles pour la collectivité et les ménages, pas d'analyse de scénarios se distinguant par la demande électrique, pas d'analyse des coûts d'économie d'énergie produits par l'UFE et par Global Chance. Il y a là une carence significative de l'ostracisme dans lequel est maintenue en France la question des économies d'électricité...

Quand on compare par exemple les scénarios « Sortie du nucléaire en 2031 » et « EPR 2031 » mentionnés plus haut, on constate en effet que ce sont les économies d'électricité qui donnent une justification non seulement physique, mais aussi économique au scénario de sortie du nucléaire. Les coûts au kilowatt-heure de ces mesures d'économie sont nettement plus faibles en moyenne que celui du kilowatt-heure distribué à l'utilisateur: ils sont de l'ordre de 9 centimes d'euro par kilowatt-heure économisé, tandis que le kilowatt-heure consommé coûte à l'usager

environ 13 centimes. Les économies réalisées sur les quantités d'électricité à produire, à transporter et à distribuer constituent la part principale de l'avantage économique calculé.

Sortir du nucléaire en 2031 est possible

Dans le scénario « Sortie du nucléaire en 2031 », le coût du kilowatt-heure est certes supérieur de 20 pour cent, mais la facture globale (et donc celle des ménages) est inférieure de 25 pour cent. Une analyse de sensibilité au coût du nucléaire montre qu'avec un coût de 60 euros par mégawatt-heure, la facture annuelle dans le scénario « EPR 2031 » tomberait en 2031 à 63 milliards d'euros et se situerait en haut de la fourchette des coûts globaux annuels du scénario « Sortie du nucléaire en 2031 ». Il n'est ainsi pas sûr d'un strict point de vue économique, que la stratégie de prolongation de la durée de vie du parc actuel soit la meilleure.

Au-delà du débat sur les chiffres, on voit bien apparaître le risque que fait courir une analyse du mix de production

d'électricité sans se préoccuper du niveau de demande et de sa maîtrise.

Le débat énergétique de la campagne électorale est bienvenu dans un pays où il est resté confiné trop longtemps dans les seules sphères du pouvoir exécutif et de l'administration. Mais il faut prendre garde qu'il ne se réduise pas très vite au seul débat sur la production d'électricité et à des considérations purement économiques.

Un an après le sommet de Copenhague et l'accident de Fukushima, les œillères de l'économie productive risquent de nous faire oublier les enjeux principaux de la transition énergétique, et de nous inciter à poursuivre, par conservatisme méthodologique, des politiques inadaptées aux enjeux du long terme. Parmi ces enjeux et ces risques figure la reversibilité du nucléaire, qui laisse aux générations futures, parfois lointaines, des coûts considérables que le calcul économique peine à prendre en compte.

Prenons garde enfin que la focalisation actuelle des principales forces politiques sur le débat économique n'ait pas aussi pour conséquence, voire pour fonction chez certains, de passer Fukushima par pertes et profits.

Politiques de SÉCURITÉ, quelle efficacité ?

Les politiques de sécurité mises en œuvre réduisent-elles la délinquance ? Certaines, oui, comme la police de proximité et les programmes cognitivo-comportementaux. D'autres, non, telles que la vidéosurveillance et le durcissement des peines.

Sebastian Roché

Le 12 janvier 2012, le ministre de l'Intérieur, Claude Guéant, se réjouissait des nouveaux chiffres de la délinquance pour 2011 : une baisse globale de 0,3 pour cent par rapport à 2010, soit de plus de 16 pour cent depuis que Nicolas Sarkozy a mis en place sa politique de sécurité, en 2002 ; 56 crimes et délits pour 1 000 habitants en 2010, contre 67 en 2002... Toutefois, ces chiffres publiés chaque année soulèvent plus de questions qu'ils n'apportent de réponses : qu'entend-on par délinquance ? Quels crimes et délits sont pris en compte ? Comment ces chiffres ont-ils été obtenus ? Et surtout comment savoir si leurs variations ne sont pas imputables à d'autres facteurs que les politiques de sécurité mises en place ? Enfin, quelle est l'efficacité des différentes mesures prises dans le cadre de ces politiques policières ?

Police de proximité, vidéosurveillance, peines plancher, durcissement des peines, centres éducatifs fermés... Nombreuses sont les mesures de sécurité mises en œuvre ces dernières décennies en France et ailleurs. Émanant à la fois de la police et de la justice, ces dispositions sont prises pour lutter contre les délinquances. Elles visent à dissuader les délits, à neutraliser leurs auteurs et, enfin, à réduire les récidives. Quelle est l'efficacité de ces mesures ? Répondent-elles aux objectifs fixés ?

Une évaluation rigoureuse s'impose

Pour le savoir, les sciences sociales de divers pays se sont lancées dans des programmes de recherche considérables afin de mesurer scientifiquement l'efficacité des interventions et programmes publics. Les pays les plus avancés dans ce domaine sont les États-Unis, la Grande-Bretagne et, dans une moindre mesure, le Canada et certains pays européens, telle la Suède. En France, ces études sont inexistantes.

Les résultats des recherches quant à l'efficacité des programmes sont très contrastés. C'est ce que nous allons voir à propos de quelques-unes de ces dispositions, parmi les plus discutées dans l'espace public. En matière de police, nous nous intéresserons à l'apparition de nouvelles doctrines – la « police communautaire » (la police de proximité en France) et la « police orientée par les problèmes », deux orientations policières visant à empêcher les délits – et au déploiement d'un outil, la vidéosurveillance. Du point de vue judiciaire, nous considérerons l'accroissement de la sévérité des peines et les programmes cognitifs et comportementaux visant à limiter la récidive. À partir des études scientifiques existantes et en particulier des synthèses qui ont été réalisées, nous proposons ici de passer en revue la pertinence des réponses adoptées ou discutées en France. Nous verrons ainsi que les programmes les plus populaires chez les responsables politiques et les professionnels... sont en général inefficaces.

Les travaux présentés ici sont de nature expérimentale, c'est-à-dire qu'ils découlent d'observations menées par des sociologues suivant des méthodes rigoureuses similaires à celles mises en œuvre dans les essais cliniques, mais appliquées « dans la société », à des quartiers ou des populations données. Dans ces expériences soigneusement

L'ESSENTIEL

Les politiques de sécurité sont l'ensemble des dispositions prises à la fois par la police et la justice pour lutter contre les délinquances.

Dans plusieurs pays, ces dispositions ont fait objet d'études scientifiques visant à évaluer leur efficacité.

Ces études montrent que la police de proximité et les programmes cognitifs et comportementaux visant à limiter la récidive sont très prometteurs.

En revanche, les programmes les plus en vogue, tels la vidéosurveillance ou le durcissement des peines, sont ceux qui n'ont pas de résultats.

Enfin, aucune recherche rigoureuse n'est réalisée sur l'efficacité des politiques de sécurité.

© Shutterstock/Elmur

conçues, les différents sujets observés (soit des zones géographiques, soit des individus) sont répartis en deux groupes : le groupe expérimental, sur lequel une intervention a lieu, et le groupe témoin, comparable au groupe expérimental et sur lequel aucune intervention n'a lieu. On étudie ces deux groupes au moins à deux moments, avant et après l'intervention. L'expérimentation est conçue de façon à mettre en évidence l'efficacité du programme, c'est-à-dire l'amélioration ou la dégradation de la situation des participants imputable au programme, et à en mesurer l'importance (ou la « taille de l'effet » que le programme produit sur les sujets ou participants). Ces travaux sont menés dans des « méta-analyses », c'est-à-dire des analyses statistiques d'un ensemble d'études.

Une police fondée sur le lien social

Examinons d'abord les dispositions d'ordre policier, à commencer par la police communautaire. Née aux États-Unis après des vagues de meutes dans les années 1960, théorisée dans les années 1980, cette doctrine de police – on nomme ainsi l'ensemble des dispositions à prendre pour réorganiser le service rendu à la population – a plusieurs objectifs : améliorer les relations de la police avec les minorités ethniques, impliquer dans la prévention la population et différents partenaires telles les associations de quartier et les associations religieuses, et, enfin, rassurer la population. Elle est fondée sur deux principes : un travail en relation avec divers partenaires sur le terrain et une approche des délits commis visant non seulement à arrêter les coupables mais aussi à comprendre le mécanisme qui favorise les délits et l'enrayer.

Cette nouvelle façon de faire de la police a pour objectif d'endiguer la tendance des policiers à réagir à chaque délit après qu'il a été commis plutôt que de chercher à éviter qu'il ait lieu. Elle s'est accompagnée de deux développements depuis les années 1990 : la « police de proximité » en France, Espagne ou Suisse, par exemple (ou police de voisinage en Grande-Bretagne) et la police dite « en résolution de problème », qui vise à identifier les problèmes sous-jacents à l'appel à la police, devenue depuis la « police orientée par les problèmes » (POP) et que nous nommerons police analytique. Ces formes de police sont soucieuses de la relation avec

L'AUTEUR



Sebastian ROCHÉ est directeur de recherche au CNRS, Pacte-Institut d'études politiques, Université de Grenoble.

✓ À ÉCOUTER

Jeudi 12 avril 2012, Sebastian Roché reviendra sur les politiques de sécurité en France dans la parole « Actualités » de l'émission *La marche des sciences*, sur France Culture de 14h à 15h.
www.franceculture.com

la population, mais ont mis un accent particulier sur la lutte directe contre les désordres et la délinquance de rue.

En France, déployée à partir de 1999, la police de proximité se traduit par la présence de postes de police de quartier et de fonctionnaires qui y sont affectés en permanence, ce qui garantit leur visibilité et leur accessibilité. Elle cherche à créer des liens dans le voisinage avec les groupes sociaux divers, commerçants, établissements scolaires, associations sportives. Son objectif est double : la dissuasion, mais aussi le traitement en amont des problèmes qui aboutissent à des délits, tels les conflits de voisinage se traduisant parfois par des coups et blessures. Elle favorise particulièrement les enquêtes sur les petits délits souvent négligés par rapport aux grandes affaires qui nécessitent une forte mobilisation des moyens.

Quelle efficacité attendre de la police communautaire ? L'évaluation des premiers dispositifs aux États-Unis a montré que, le plus souvent, les effets sur la délinquance de rue – principalement les vols qui touchent les voitures et les personnes, les coups et blessures, mais aussi les cambriolages – n'étaient pas significatifs.

bien que cela ait été le cas pour certains projets réalisés, par exemple en Australie. En revanche, on enregistre bien une diminution systématique des désordres ou incivilités – graffiti, dégradations diverses des lieux publics, dérapages verbaux – ainsi qu'une augmentation de la confiance de la population, pourvu que la police patrouille à pied plutôt qu'en voiture.

Plus récemment, l'évaluation expérimentale de la police de voisinage, lancée en 2003 en Grande-Bretagne, a montré une plus-value contre les délinquances de rue. Dans une étude de 2006, Rachel Tuffin, Julia Morris et Alexis Poole, du *Home Office*, le Département britannique de l'Intérieur, ont montré que, comparées deux à deux, les zones expérimentales où la police de voisinage était déployée avaient de meilleurs résultats que les zones témoins : les quartiers où la police de voisinage s'était implantée présentaient une délinquance de rue jusqu'à 36 pour cent moindre (voir l'encadré ci-dessous).

Enfin, un effet indirect de la police communautaire sur la délinquance a été identifié par des chercheurs de l'Université de Denver, aux États-Unis : selon eux, une partie de l'effet de la police communautaire

La police de voisinage évaluée en Grande-Bretagne

En 2003, le *Home Office*, le Département britannique de l'Intérieur, a décidé de soutenir le déploiement d'équipes de police de quartier dans les forces de police régionales. En Grande-Bretagne en effet, les forces de police sont régionales avec un pilotage mixte, pour une part central à travers le *Home Office*, et pour une part local. Le *Home Office* définit une orientation de police – en l'occurrence la police de voisinage – et la soutient en mettant au point une doctrine, en lançant des effectifs, en sa mise en place dans des zones pilotes, et en participant au financement de sa diffusion.

La doctrine insiste sur l'entrée en relation avec les « voisinages », l'identification de problèmes locaux qui font que les personnes se sentent en insécurité, sur la décision partagée avec les partenaires quant aux actions à entreprendre, sur la satisfaction des habitants. Cette doctrine a débouché sur la création de nombreuses équipes de police dans

le pays : 30 en 2010. Son efficacité a été évaluée en 2004-2005 par une recherche de type expérimental.

Les chercheurs ont constitué trois paires de sites aussi semblables que possibles en termes de variables qui affectent la délinquance de rue (l'urbanisation, la pauvreté ou la composition démographique du quartier, par exemple). Dans chaque paire, un site expérimental reçoit le nouveau programme de police de voisinage (la ville de Fallowfield dans la métropole de Manchester, les sections électorales Ince dans le comté du Lancashire, et New Parks dans le comté du Leicestershire, etc.) et un autre du même secteur ne modifie pas sa méthode de fonctionnement (le site de contrôle). On comptabilise les délits à deux moments distincts. La période de 12 mois qui précède la mise en œuvre est ensuite comparée à la période de 12 mois qui suit.

et sa structure, pendant laquelle la force de police a appliqué la nouvelle doctrine.

On observe ainsi des évolutions dans le nombre total des délits constatés par la police avant et pendant la mise en place de la police de voisinage, tout en comparant la zone expérimentale et la zone de contrôle. Par exemple, à Manchester, on observe que la délinquance de rue – coups de voitures, cambriolages, coups et blessures – a diminué entre les deux périodes dans les deux zones observées, mais plus dans la zone expérimentale de Fallowfield (– 36 pour cent) que dans la zone de contrôle (– 13 pour cent), soit un écart de dix pour cent en faveur de Fallowfield.

Dans tous les cas (toutes les paires de sites étudiées), les zones où la police de voisinage a été mise en place font globalement de meilleurs résultats que les zones de contrôle, mais l'écart n'est significatif que pour les délits de rue.

Dans cette région, une augmentation de la délinquance de rue a été observée (+ 24 pour cent) entre les



Un agent de police de voisinage britannique de dos.

deux périodes d'observation pour la zone de contrôle, mais pas pour la zone expérimentale d'Ince, qui a connu une diminution (– 12 pour cent). L'écart entre les deux éléments de la paire est donc très marqué (36 pour cent). La même tendance générale a été observée pour les chiffres de la délinquance enregistrés par sondage et non plus par la police.

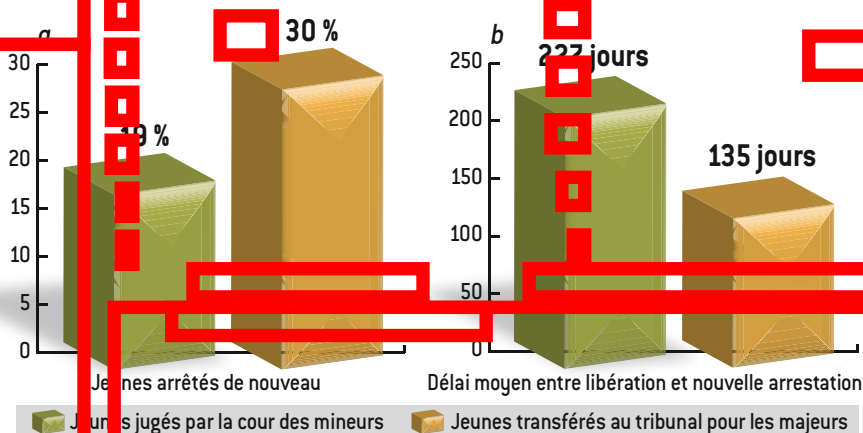
sur la délinquance de rue est liée à la diminution du nombre de désordres que cette organisation entraîne dans un quartier.

Les études sont encore trop peu nombreuses pour dire si la police communautaire est efficace à chaque fois pour faire baisser la délinquance. En outre, les effets mesurés rigoureusement d'une action de police, qu'elle soit préventive, dissuasive ou répressive, sur certaines délinquantes, sont généralement modestes (entre cinq à dix pour cent). Néanmoins, les résultats obtenus jusqu'à présent font de la police communautaire une approche des plus prometteuses qu'il serait dommage d'abandonner, comme cela se passe actuellement en France depuis la décision présidentielle, en 2002, de supprimer la police de proximité.

Une police qui résout les problèmes

La police analytique est une autre voie prometteuse. Initialement confondue avec la police communautaire parce qu'elle découle aussi d'un diagnostic partagé par diverses organisations – la police, des entreprises, des associations, des collectifs d'usagers –, elle cherche à développer des réponses durables. Elle ne constitue pas une stratégie de police, mais plutôt une méthode. Elle consiste, pour la police, à identifier et hiérarchiser les problèmes, les analyser, concevoir des réponses, évaluer l'impact de chacune d'elles (cette méthode est connue sous son acronyme en anglais SARA). Par exemple, en 2002, des chercheurs américains ont montré comment la police avait, par cette voie, réduit les vols de matériels sur des sites de construction de logements : en 1999, la ville de Charlotte en Caroline du Nord, en plein essor, comptait 66 chantiers immobiliers, gérés par 43 entreprises différentes. Devant le nombre croissant de vols de matériel, notamment d'appareils électroménagers, la police a engagé la discussion avec les chefs de chantier pour mieux comprendre la situation, augmenté les patrouilles et enquêté sur les voleurs.

Les policiers sont arrivés à la conclusion que les voleurs n'étaient pas organisés et qu'ils étaient vite rebutés par les obstacles. Ils laissaient les appareils intégrés dans une cuisine équipée, par exemple. Ils ont donc limité la facilité d'accès aux chantiers et recommandé de n'installer les appareils que lorsque les habitants



1. EN LOUISIANE, LES MINEURS JUGÉS COMME DES MAJEURS sont plus nombreux à être arrêtés à nouveau que ceux jugés par la cour des mineurs (a) et récidivent plus souvent (b). C'est ce qu'a montré une étude réalisée par Donna Bishop et ses collègues dans les années 1990 sur 2 738 jeunes délinquants jugés par la cour des mineurs pour des délits similaires. La même étude, refaite sur des jeunes arrêtés en 1995-1996, confirme ces résultats.

avaient emménagé. Les chercheurs ont ainsi montré qu'en 2000, les vols d'appareils électroménagers avaient diminué de près de 50 pour cent par rapport à 1998 sur les chantiers qui avaient suivi les consignes, alors qu'ils restaient similaires sur les autres. En ne se contentant pas d'identifier les auteurs après coup, mais en cherchant, par une analyse des problèmes, à éviter que les délits soient commis, la police a diminué le nombre de différents types de vols de chantier. Bien d'autres exemples ont montré que cette approche est encourageante, notamment dans la lutte contre les trafics de drogue concentrés dans certains lieux.

Pour David Weisburd, de l'Université George Mason, aux États-Unis, et ses collègues, auteurs, en 2010, de la meilleure synthèse des études conduites aux États-Unis et en Grande-Bretagne, la police analytique serait même plus que prometteuse : elle serait efficace. Pour les sociologues, une approche est efficace lorsque trois études au moins convergent dans le même sens. Sur les 5564 études identifiées, les chercheurs américains ont retenu 10 études d'une rigueur satisfaisante, et 45 autres qu'ils ont analysées séparément, car elles suivaient bien des zones avant et après l'intervention, mais ne présentaient pas de groupe contrôle. Sur les dix études sélectionnées, huit montrent un effet en faveur de la police analytique, indiquant une diminution faible, mais significative de délinquances ou des désordres.

Les 41 études sans groupe témoin sont aussi instructives. Parmi elles, 43 ont montré une diminution significative des délits étudiés, de 32 pour cent en moyenne. Cette proportion et la taille de l'effet bénéfique sont à nuancer par le fait

que ces études ont été déposées lors d'un concours organisé par le gouvernement américain sur la police analytique. Aussi, seules celles obtenant de bons résultats positifs ont probablement été présentées, mais cela montre que de nombreux services de police sont capables de mettre en œuvre cette approche.

En France, l'approche de la police analytique n'est pas réellement mise en œuvre. Certes, la police procède à des formes d'analyse des problèmes, notamment en consultant les décideurs sur l'aménagement des espaces collectifs (les gares, par exemple) avant leur construction. Elle le fait également au coup par coup pour des affaires importantes. Mais, pour la masse de la délinquance de rue, l'orientation est plutôt à la gestion verticale. La direction parisienne demande aux services des chiffres d'activité centrés sur l'après délit (faits élucidés, garde à vue...). Au total, la doctrine de la police analytique n'est ni formalisée ni implantée par un cours à la formation ou à des circulaires imposant son utilisation...

Le dernier aspect que nous aborderons en matière de police est l'utilisation de la vidéosurveillance dans la lutte contre la délinquance. Cet outil remplit-il sa fonction ? La contribution de la vidéosurveillance à la lutte contre la délinquance a été évaluée plusieurs dizaines de fois, principalement aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en Australie. Une première méta-analyse a été produite en 2002 à Cambridge, en Grande-Bretagne, par Brandon Welch et David Farrington, et une seconde en 2005 par Martin Gill et Angela Spriggs, de l'Université de Exeter, en Grande-Bretagne. Le Home Office a financé ces

travaux. Le Département britannique de l'Intérieur est en effet centré sur la définition et l'analyse des politiques de sécurité, et ne s'implique pas dans la gestion opérationnelle. Deux travaux australiens complètent le tableau déjà bien documenté fourni par ces deux méta-analyses.

La vidéosurveillance : inefficace dans la rue

En France, les résultats de l'étude menée par les inspections de l'administration, de la police et de la gendarmerie sont inexploitablement. Le rapport rendu à l'été 2009 comporte trop d'erreurs de méthode pour être pertinent : l'étude fait un amalgame de tous les types de délits et est pratiquée sur des zones trop vastes (des villes entières et non des « morceaux de villes »), les périodes d'observation sont mal définies et ne prennent pas en compte la mise en service progressive des caméras à l'échelle d'une ville, les zones tests et témoins n'ont pas les mêmes caractéristiques, d'autres variables comme l'éclairage ne sont pas prises en compte...

Le travail réalisé par D. Weisheit et D. Farrington couvre 46 recherches et en a

En France, il est urgent d'étudier l'efficacité :

- ✓ **Ces centres éducatifs** fermés où sont pris en charge les mineurs récidivistes depuis 2002.
- ✓ **Ces peines planchers** mise en place en 2007 pour lutter contre la récidive.
- ✓ **Ces policiers** « patrouilleurs » lancés en mai 2011 par Claude Guéant, ministre de l'Intérieur.
- ✓ **Ces caméras** installées dans les rues de nombreuses villes depuis les années 1990.

retenu 22 d'une qualité suffisante sur une longue période et deux pays (États-Unis et Grande-Bretagne). Pour 18 d'entre elles, les données étaient disponibles et ont pu être entrées dans une méta-analyse. Neuf études indiquent une baisse de la délinquance dans les zones vidéosurveillées par rapport à celles qui ne le sont pas, mais les neuf autres ne retrouvent pas cet effet. En outre, l'efficacité de la vidéosurveillance pour dissuader la délinquance varie suivant les lieux et les délits. D'une part, cinq études portant sur les rues de centres-villes, les immeubles d'habitation (et non les espaces autour des immeubles) dans les quartiers de type HLM, et quatre études dans les transports publics montrent respectivement peu (moins de deux pour cent) ou pas de réduction significative du niveau de délinquance imputable aux caméras. D'autre part, les huit études ciblant des parkings montrent une réduction de 41 pour cent des vols ou effractions de voitures (la neuvième n'est pas interprétable).

La méta-analyse britannique de 2005 porte sur 13 des 352 projets d'équipement décidés par le *Home Office* lors de la seconde phase du programme lancé en 1996 par le gouvernement. Toutes les zones étu-

Une approche cognitive-comportementale contre la récidive

Plusieurs méta-analyses américaines ont montré l'efficacité de l'approche cognitive-comportementale pour diminuer la récidive. Les études prises en compte dans ces méta-analyses comparent en général, pour un type de délit, le comportement de délinquants récidivistes avant et après le traitement à celui de délinquants présentant des caractéristiques proches, mais n'ayant pas suivi de traitement. Voici l'exemple d'une telle étude, réalisée au Canada sur 347 délinquants sexuels ayant participé à un programme cognitivo-comportemental (Goggin et al., 2000, 2004). Un groupe témoin est composé de 137 délinquants sexuels qui n'ont pas eu de traitement, issus d'une base de données déjà existante.

Les participants ont été évalués par des échelles – sous forme de questionnaires – qui mesurent, par exemple, leur risque de récidive, leur distorsion cognitive en matière de violences sexuelles, leur empathie et leur maîtrise de soi. Les questionnaires servent à évaluer leurs progrès en cours de traitement, et les échelles ont été remplies au début et à la fin du traitement.

Le programme ciblait distorsions cognitives, fantasmes et comportement sexuel déviant, l'acquisition d'habiletés sociales, la gestion de

la colère et des émotions, l'empathie et la sensibilité aux traumatismes des victimes. Il avait pour but de permettre au délinquant de mieux comprendre sa vulnérabilité à ses propres facteurs de risque, d'élaborer des stratégies pour éliminer ou contrôler ces facteurs et d'accroître sa sensibilité aux effets des agressions sexuelles sur les victimes. Concrètement, lors de séances de groupe, les délinquants à risque élevé de récidive ont participé à des ateliers de 16 à 14 heures par semaine pendant quatre à cinq semaines, 3 à 5 heures par semaine pendant deux à trois mois).

Le thérapeute demande souvent de tenir un journal quotidien. Cela aide – le thérapeute et le sujet – à identifier le mode de pensée, les émotions, les sensations physiques et le comportement du sujet : lors d'une situation de crise, les réactions diffèrent en fonction des processus cognitifs, émotionnels et comportementaux. Ces réactions peuvent être soit négatives, soit positives, selon la perception que l'on a de la situation.

Après avoir identifié les comportements sur lesquels il faudra travailler, le thérapeute donne un programme d'exercices mentaux à pratiquer

quotidiennement, par exemple remettre en question une pensée agressive ou négative et la remplacer par une autre positive. Ou reconnaître que l'on va commettre un acte qui aura des effets négatifs et le remplacer par un acte positif.

La période de suivi après le traitement s'étendait entre la date de mise en liberté et la date d'une nouvelle condamnation ou celle de fin de l'étude (Guillet 2005). Les résultats des analyses indiquent une amélioration notable après le traitement de presque tous les paramètres cognitifs et comportementaux suivis. En outre, la récidive sexuelle était inférieure de 68 pour cent chez les participants ayant suivi le traitement par rapport au groupe contrôle, et la récidive totale (perpétration d'une nouvelle infraction, quelle qu'elle soit), inférieure de 77 pour cent.

L'étude a certes ses limites. Notamment, le Service correctionnel du Canada ayant l'obligation de offrir un traitement à tous les délinquants, les échantillons ne sont pas strictement aléatoires : les délinquants, bien qu'appariés, n'ont pas été sélectionnés de façon indépendante du traitement ou du groupe témoin. Néanmoins, elle contribue à montrer l'efficacité de ce type d'intervention auprès des délinquants sexuels.

diées sont urbaines. Elle est l'occasion d'un certain nombre d'améliorations méthodologiques : par exemple, l'étude prend en considération des traits du système de vidéosurveillance lui-même (nombre de caméras, fonctionnement de la salle de contrôle des images, etc.). Sur les 13 projets, seuls deux ont l'effet recherché par les autorités, après comparaison avec les zones témoins. Sept indiquent une augmentation de la délinquance sans que la vidéosurveillance puisse en être la cause. L'efficacité est en revanche avérée dans l'étude consacrée à Hawkeye, une zone de Londres qui couvre 58 parkings : alors que la délinquance contre les véhicules ne baisse que de 10 pour cent dans les zones de contrôle, elle décroît de 60 à 80 pour cent dans les parkings vidéosurveillés qui présentaient, avant l'installation des caméras, des taux de vols importants.

Les deux études australiennes, enfin, n'ont pas montré de modification du nombre total de délits commis, de vols ou d'autres atteintes à la propriété comme les dégradations. Elles comparaient, entre 1995 et 2002, des lieux surveillés et non surveillés, d'une part, de zones de bord de mer dans deux localités australiennes et,

BIBLIOGRAPHIE

S. Roché, La vidéosurveillance réduit-elle la délinquance ?, *Pour la Science*, n° 394, pp. 20-24, 2010.

S. Roché, Les incivilités, catalyseurs de la délinquance ?, *Pour la Science*, n° 389, pp. 54-62, 2010.

M. Lipsey et al., Effect of cognitive behavioral programs for criminal offenders, *Campbell Systematic Reviews*, vol. 6, 2007.

F. Tortoni et K. Nunes, Recherche sur l'efficacité du traitement chez les délinquants sexuels dans l'agression sexuelle, *au-delà des frontières*, Congrès international francophone sur l'agression sexuelle, 2007.

R. Tuffin et al., An evaluation of the impact of the National Home Office Policing Programme, *Home Office Research Study*, vol. 296, 2006.

B. Steiner et E. Wright, Assessing the relative effects of state direct fine waiver laws on violent juvenile crime : deterrence or irrelevance ?, *The Journal of Criminal Law and Criminology*, vol. 96, n° 4, pp. 1451-1478, 2006.

d'autre part, de quatre gares de trains situées sur la même ligne.

En d'autres termes, la vidéosurveillance est loin d'être le remède miracle contre la délinquance, contrairement à ce que suggère le rapport rendu en 2009 par l'Inspection générale de l'administration du ministre de l'Intérieur français. Son efficacité n'est prouvée que dans des lieux clos à risque, tels certains parkings.

Le durcissement des peines ne diminue pas la récidive

Passons à présent aux dispositions prises par la justice pour lutter contre les délinquances. La prison est-elle une bonne solution pour assurer la sécurité des citoyens et limiter la récidive ? Faut-il dépenser plus pour incarcérer plus ? Ou bien, au contraire, ne conviendrait-il pas de mettre l'accent sur les programmes qui permettent la réadaptation des délinquants à la vie « normale » ?

La voie d'une augmentation de la sévérité pénale consiste à incarcérer plus souvent et plus longtemps. Différents outils permettent de le faire, comme l'envoi automatique en prison au troisième délit, en vigueur dans 26 États américains, ou le jugement automatique des mineurs récidivistes comme des majeurs, pratiqué dans quelques dizaines d'États américains, notamment l'État de New York. En France, l' accroissement de la sévérité pénale se traduit par l'obligation légale des juges, depuis 2007, de prononcer des peines minimales obligatoires – des peines planchers –, à l'encontre des récidivistes. De nombreuses études ont été réalisées sur l'effet de l'augmentation du recours à la prison et de la durée de la peine – conséquences de la mise en place des peines planchers. Cette pratique a débuté à New York en 1973, puis s'est propagée dans plusieurs dizaines d'États américains (13 en 1979 et 31 en 2003). La Floride est celui qui a le plus eu recours à une telle pratique. Les effets attendus sont, d'une part, une « dissuasion générale » géographique (on espère qu'il y aura moins de délits sur la zone où la loi change, puisque les auteurs craignent la sévérité renforcée) et, d'autre part, une diminution de la récidive à l'échelle de l'individu (on espère qu'il y aura moins de nouvelles arrestations ou condamnations de la personne qui a subi la sanction, qu'elle risque gros désormais).

	Nombre de participants	Score moyen avant le programme	Score moyen après le programme
Sentiment de solitude	257	41,6/80	37,5/80
EMPATHIE DES AGRESSEURS D'ENFANTS			
Envers les enfants en général	139	319,5/500	340,8/500
Envers un enfant victime d'une agression sexuelle	139	374,8/500	407,3/500
Envers un enfant victime du délinquant	139	356,8/500	415,9/500
EMPATHIE DES VIOLEURS			
Envers les femmes en général	69	321,5/500	324,5/500
Envers une femme victime d'une agression sexuelle	69	378,9/500	409,1/500
Envers une femme victime du délinquant	69	362,3/500	404/500

LES RÉSULTATS DES ENQUÊTES PAR QUESTIONNAIRES auprès des délinquants avant et après le programme reflètent leur évolution sur divers aspects étudiés. Ainsi, après le programme, les agresseurs d'enfants témoignent en moyenne d'une plus grande empathie pour les enfants en général, et notamment pour ceux victimes d'une agression sexuelle ou pour leur propre victime. Des résultats similaires sont obtenus avec les violeurs. Tous les écarts de score présentés dans ce tableau entre la période qui précède le traitement et celle qui lui est postérieure sont statistiquement significatifs et sont corrélés avec des modifications comportementales en matière de récidive.



© Shutterstock / pphoto

2. EN FRANCE, LES CENTRES ÉDUCATIFS FERMÉS (CEF) accueillent en 2012 plus de 1 200 mineurs, soit environ le double des moins de 18 ans en prison. Les responsables qui gèrent ces centres s'inquiètent du manque de qualification des équipes qui y travaillent : elles font face à des jeunes auteurs de délits sérieux, et ont souvent une formation et une expérience insuffisantes pour gérer la violence dans le centre, ce qui entraîne un confinement et une punition de moins en moins importants des personnes. Les places en CEF sont de surcroît les plus nombreuses dans les régions qui en ont le moins besoin, selon le rapport du Sénat du 12 juillet 2011.

En 2006, Benjamin Steiner et Emily Wright, de l'Université de Cincinnati, aux États-Unis, ont passé en revue l'ensemble des études testant l'effet de dissuasion générale. Au total, les chercheurs disposent de données sur 22 États américains. Aucun effet dissuasif durable n'est observé. Le nombre mensuel d'arrestations sur plusieurs années dans les États qui introduisent de telles lois (groupe expérimental) est le même que celui des États qui ne le font pas (groupe contrôle). Par exemple, lorsqu'en 1978 la loi a été durcie dans l'État de New York envers les jeunes de 13-14 ans auteurs de meurtres, viols, vols à main armée et cambriolages violents (l'âge de la minorité pénale a été abaissé), les arrestations des jeunes de cet âge ont évolué de la même façon que dans le cas témoin, le New Jersey (l'État voisin), qui n'avait pas durci sa loi.

À l'échelle de l'individu, les résultats des études disponibles (Floride, Pennsylvanie, New York) convergent : l'élévation de la sévérité pénale se traduit par un renforcement de la récidive (voir la figure 1). Une méthode consiste à constituer des appartements. Par exemple, on observe la fréquence et la vitesse des nouvelles arrestations de deux mineurs ou jeunes majeurs comparables en tous points sauf un : la modalité de son jugement (par la justice des mineurs ou celle des majeurs). Les études montrent alors que, deux ans après leur libération, les jeunes jugés comme des majeurs sont plus souvent réincarcérés que ceux jugés comme des mineurs. Et l'écart est d'au-

tant plus grand que les jeunes ont été condamnés pour des délits violents. On pense que cette hausse de la récidive en réponse à l'augmentation de la sévérité des peines est liée au fait que la punition elle-même n'amende pas les personnes et que la prison rend plus compliquée la réinsertion à la sortie (elle distend notamment les liens avec la société légale).

Aider les délinquants à ne pas récidiver

Mais alors, existe-t-il des méthodes permettant de lutter efficacement contre la récidive, et particulièrement pour les auteurs des plus violents ? La réponse est oui. Plusieurs ont déjà fait leurs preuves, telles la préparation de la sortie de prison, ou la construction de passerelles entre la prison et la société. Une des méthodes les plus efficaces est l'approche « cognitivo-comportementale », ou une variante dite « relationnelle comportementale », dont le nom diffère afin de souligner l'importance du lien social pour l'abandon des pratiques délinquantes (l'accent y est mis sur le terme, la personne sur laquelle s'appuie le délinquant pour s'en sortir).

Cette approche est en plein développement notamment en Grande-Bretagne, aux États-Unis et en Belgique, rassemble des travaux de théoriciens et de praticiens qui s'intéressent à la façon dont une personne perçoit son environnement social et physique. À nouveau, des synthèses des nombreuses

études sur l'efficacité de cette approche ont prouvé que cette voie méconnue en France est efficace pour limiter la violence.

En quoi consiste-t-elle ? Il s'agit tout d'abord d'une approche individuelle, qui ne se confond donc pas avec celles qui opèrent sur des populations larges, par exemple en améliorant le cadre social (quartier, école, revenu de revenu des familles) et relèvent de la prévention dite primaire. La méthode cognitivo-comportementale fonctionne sur différents profils de personnes (mineurs et majeurs, filles ou garçons, dans le cadre « ouvert » de la société ou plus fermé, lorsqu'ils sont placés dans un centre spécialisé) et s'adresse à des auteurs « confirmés » de délits, c'est-à-dire ayant une forte propension à la récidive. De nombreux travaux ont souligné que les délinquants ont des « biais » cognitifs, c'est-à-dire qu'ils ne perçoivent pas leur environnement comme le reste de la population. Par exemple, ils perçoivent des remarques anodines comme des provocations délibérées et sont à la recherche de gratifications immédiates (même si cela leur « coûte cher » plus tard). Ils se perçoivent comme des victimes et comme ceux que l'on blâme injustement, tout en refusant que leur propre comportement puisse contribuer à leur situation.

La méthode est fondée sur l'hypothèse que les biais sont appris (ils ne sont pas présents naturellement). Ils peuvent donc être « désappris ». Elle cherche à développer le sens de la responsabilité individuelle en permettant à la personne de comprendre les processus mentaux et les choix qu'elle fait, toutes choses qui la conduisent à son comportement délinquant. Bref, avec ce programme, des compétences cognitives sont construites. Elles s'appuient sur un soutien relationnel fort. Différentes techniques sont enseignées à ceux qui suivent cette approche : la gestion de leur colère, le développement d'habiletés sociales indispensables à la vie en société (identifier ses propres difficultés et des actions possibles pour les surmonter, résoudre des différends avec autrui sans violence), la construction d'un sens moral (apprendre à percevoir le mal qu'un délit fait à la victime), la prévention de leur rechute (éviter de fréquenter certaines personnes ou certains lieux). Ces techniques sont apprises dans le cadre de jeux de rôle ou dans des situations réelles, mais aussi par des exercices réalisés seul (voir l'encadré page 40).

En 2002, dans une méta-analyse de 69 études, Frank Peeters et ses collègues,

des Instituts américains de développement et de recherche (NDRI), ont montré que cette approche réduit la récidive de 30 pour cent. Cet ordre de grandeur a été confirmé par les travaux ultérieurs. Des études circoscrites à certaines populations plus à risques ont même montré des réductions de 50 pour cent.

Il est temps d'utiliser les programmes efficaces

Une méta-analyse de 2007, la plus récente et la plus rigoureuse, réalisée par Mark Lipsey et ses collègues de l'Institut Vanderbilt pour les études de politique publique de Nashville, aux États-Unis, conclut que la probabilité de ne pas récidiver dans les 12 mois pour ceux qui ont suivi le programme est 1,53 fois plus élevée que pour les participants des groupes témoin, (soit une baisse de la récidive de 25 pour cent). Et dans cette méta-analyse aussi, les programmes les plus efficaces engendrent une diminution de la récidive de 50 pour cent.

Par ailleurs, selon cette même synthèse, les plus fortes réductions de la délinquance sont obtenues sur les individus présentant le plus de risques de récidiver. Enfin, une autre méta-analyse de 23 études publiée au Canada en 2009 et limitée à la récidive chez les auteurs d'agressions sexuelles montre également des résultats encourageants.

L'étude scientifique de l'efficacité des programmes de prévention et de répression est possible. Elle a déjà commencé à l'étranger. En 2007, 40 ans après les États-Unis, la France a enfin entamé cette démarche sur les politiques sociales. Toutefois, malgré un affichage politique important du thème de la sécurité d'une institutionnalisation de l'évaluation et de la création d'un observatoire de la délinquance et des réponses pénales, la mesure scientifique de l'efficacité des politiques de sécurité n'a toujours pas débuté. Le gouvernement tente d'internaliser les études dans ses services alors que la solution performante consiste à les confier à des organismes disposant à la fois de l'expertise scientifique et de l'indépendance requise. En conséquence, nous souffrons d'un retard considérable.

L'approche scientifique montre l'écart entre la conviction des responsables politiques qu'une « solution est la bonne » et la preuve que « c'est bien le cas ». De façon générale, les programmes inefficaces sont les plus populaires chez les responsables politiques et les professionnels. Ainsi, le fait de déployer la vidéosurveillance dans les rues et sur les places, de se focaliser sur une réaction de la police, de faire punir plus lourdement les mineurs par les juges, n'apporte guère de gain durable. On pourrait ajouter qu'il en va de même pour les camps militaires pour les jeunes ou l'information sur les drogues dans les classes.

Les voies prometteuses sont la police analytique ou encore une intervention qui aide les jeunes délinquants violents à changer la façon dont ils perçoivent leur environnement, ce que ne peut réussir l'enfermement « sec ». Contrairement aux déclarations pessimistes qui ne voient rien à faire contre la délinquance, la recherche a mis en évidence des voies efficaces et d'autres prometteuses. Pourquoi ne pas les emprunter ? ■



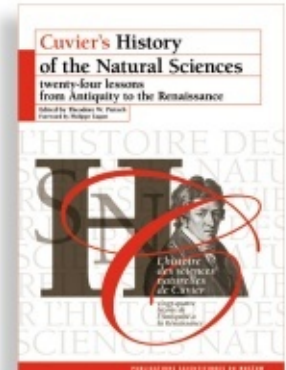
Muséum national d'Histoire naturelle

L'histoire des sciences naturelles de Cuvier

vingt-quatre leçons de l'Antiquité à la Renaissance

Nouvelle édition de Theodore W. Pietsch

L'édition de *L'histoire des sciences naturelles depuis leur origine jusqu'à nos jours* est présentée ici pour la première fois en version bilingue. Ce volume, amplement annoté et commenté, est le premier d'une série de cinq tomes regroupant les cours professés par Georges Cuvier de 1829 à 1832. Cette étude, éblouissante par son envergure et son degré de précision, couvre de manière chronologique l'histoire des sciences naturelles sur une période de plus de trois millénaires. Cuvier parlait couramment plusieurs langues, notamment l'anglais, l'allemand, l'espagnol, et le latin. Il était donc bien préparé pour rechercher des documents de première main et interpréter la littérature scientifique européenne. Cet ouvrage témoigne de la connaissance encyclopédique de Cuvier, de son expertise en matière de littérature scientifique et historique, et de son incroyable mémoire. En outre, cet ouvrage se réfère à un riche corpus de littérature ancienne qu'il est difficile de trouver ailleurs. Cette extraordinaire mine d'information donne ainsi un aperçu unique du concept des sciences naturelles vu par Cuvier et de l'envergure et du progrès de cette entreprise humaine. Grâce à cette œuvre, Cuvier comble une lacune importante dans l'histoire de la pensée philosophique, entre Carl von Linné et Charles Darwin.



**Bilingue anglais/français • 170 x 240 mm
50 figs • 734 p. • ISBN 978-2-85653-684-1 • 49 € TTC**

*ouvrage en vente dans notre librairie
face à la Grande Galerie de l'Évolution*

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications Scientifiques
Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr • <http://www.mnhn.fr/pubsci>

Histoire des sciences

Définir un **nouveau système de santé** : une urgence

André Grimaldi et Olivier Lyon-Caen

L'ESSENTIEL

- ✓ Jusqu'à dans les années 2000, notre système de santé était performant notamment pour l'accessibilité aux soins, l'espérance de vie ou les remboursements.
- ✓ Aujourd'hui, plusieurs facteurs, dont la diminution des enveloppes budgétaires consacrées aux missions d'intérêt général ou l'envolée des dépassements d'honoraires, ont accru les inégalités et menacent la pérennité du système.
- ✓ Pour garantir l'accès à des soins de qualité pour tous, il faudrait entre autres revenir à un taux de remboursement minimal de 80 pour cent par la Sécurité sociale et ne pas rembourser les médicaments inefficaces et les prescriptions inutiles.

Comment sauver notre système de santé ? Une remise à plat est aujourd'hui nécessaire si l'on veut continuer d'assurer un accès à des soins de qualité pour tous.

En 2000, le système de santé français était classé par l'Organisation mondiale de la santé premier système de santé du monde, non pas parce qu'il était le meilleur en tous les domaines, mais parce qu'il obtenait la meilleure moyenne sur un certain nombre de critères tels que l'accessibilité aux soins, les remboursements, la prévention, la mortalité néonatale, l'espérance de vie, la lutte contre les inégalités sociales en matière de santé... La couverture médicale universelle, la CMU, créée en 1999 avait fait notablement reculer les inégalités financières face à l'accès aux soins. Mais depuis dix ans, notre système de santé a régressé. En 2010, il était classé en septième position derrière les Pays-Bas, le Danemark, l'Islande, l'Autriche, l'Allemagne et la Suisse. Les différents sondages d'opinion montrent que la santé est devenue la troisième préoccupation des Français après l'emploi et le pouvoir d'achat : leur inquiétude porte sur la pérennité de leur système de santé et sur l'accessibilité à des soins de qualité pour tous. Pourtant, la France dépense plus de 11 pour cent du produit intérieur brut pour la santé, soit 175 milliards d'euros pour la consommation de soins et d'équipements médicaux. La question est donc posée : peut-on faire mieux sans dépenser plus ?

Naissance d'un système de qualité pour tous

Le système de santé français, développé à partir de 1945, résulte d'un compromis historique entre le programme du Conseil national de la résistance et les principes de la médecine libérale : liberté d'installation, libre entente sur les honoraires, liberté de prescription, libre choix du médecin par le malade, respect du secret médical. Son financement est mixte, essentiellement solidaire par le biais des cotisations sociales et de l'impôt sur le revenu.

Le « ticket modérateur » qui, initialement, avait été fixé à 20 pour cent du coût de la consultation ou de l'acte médical. Ce ticket est payé soit directement par les usagers, soit indirectement par une mutuelle ou une assurance privée. De même, la prestation est mixte, soit publique – assurée par les hôpitaux publics, les instituts (ou cliniques) privés sans but lucratif participant au service public et les centres de santé – soit privée – assurée par la médecine libérale et les cliniques commerciales (c'est-à-dire privées à but lucratif).

En 1991, un tarif conventionnel opposable permettait d'inclure les médecins libéraux conventionnés dans le service public de santé : leurs prestations étaient remboursées sur la base de tarifs négociés. Rappelons que le tarif opposable (ou conventionné) est celui qui sert de base au remboursement par l'Assurance maladie : le praticien s'engage à respecter le tarif fixé par convention. Le système s'est développé à la satisfaction de tous jusqu'à la fin des Trente Glorieuses, mais le ralentissement de l'activité économique à partir du milieu des années 1970 a posé la question de sa régulation. En effet, l'augmentation des dépenses de santé (entre trois et quatre pour cent par an) dépassait celle de la richesse nationale.

Les gouvernements avaient deux possibilités : une régulation par le marché et la concurrence, reposant sur un accroissement de la participation directe des patients au financement des soins et une extension du rôle des assurances complémentaires ou bien une régulation publique maintenant l'égalité d'accès aux soins tout en assurant l'adéquation entre les dépenses et les recettes provenant de la solidarité. La première entraîne inévitablement l'aggravation des inégalités, la seconde fait craindre le rationnement. En fait, pendant 25 ans, les gouvernements successifs ont utilisé conjointement les deux modes de régulation sans remettre en cause le compromis scellé à la Libération.

Dans l'espoir de réduire la demande, on mit en place en 1971 une réduction de l'offre grâce à l'instauration d'un *numerus clausus* à l'entrée des études médicales. L'idée était simple : en réduisant le nombre de médecins, on obtiendrait une diminution de la demande des consultations, une réduction des prescriptions médicales inutiles et une meilleure répartition des médecins sur le territoire.

Le début de la dérive

Force est de constater qu'aucun de ces objectifs n'a été atteint. Faute de pouvoir consulter un médecin en ville, les patients s'adressent aux urgences hospitalières : le nombre de consultations y est passé de 8 millions par an il y a dix ans à 16 millions par an aujourd'hui. Le « secteur 2 » à honoraires libres a été créé en 1980. Limité initialement à quelques médecins jouissant d'une notoriété particulière, il a été élargi en 1986 aux nouveaux spécialistes en réponse à une grève massive des internes. Il a ensuite été autorisé en 2004 de façon dérogatoire aux praticiens installés en « secteur 1 » (sans dépassements d'honoraires) pour les patients ne respectant pas le passage obligé par le médecin traitant.

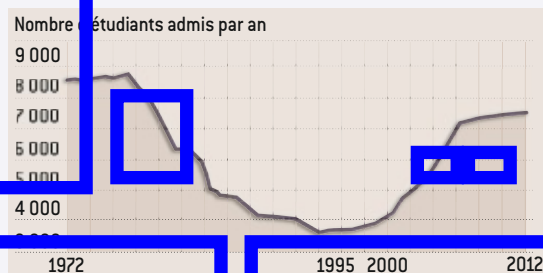
Aujourd'hui, les médecins spécialistes continuent à s'installer en secteur 2 dans les régions où les médecins installés en secteur 2 sont déjà trop nombreux. On espérait que la concurrence freinerait la concentration de ces spécialistes, alors qu'on a seulement observé une homogénéisation des dépassements d'honoraires. À l'évidence, le marché est incapable de réguler naturellement l'offre et la demande de soins. La raison en est simple : le patient ou celui qui se croit malade n'est pas un consommateur éclairé, mais une personne anxieuse faisant confiance à un professionnel. En matière de santé, la concurrence ne fait pas baisser les coûts, elle provoque au contraire leur augmentation : faute de pouvoir juger objectivement de la pertinence des prescriptions, les patients assimilent coût et qualité, persuadés qu'en payant davantage, ils seront mieux soignés.

La régulation par les mécanismes de marché a aussi été invoquée quand, en 1983, on a créé le forfait hospitalier journalier pour un montant initial médian de 20 francs, qui atteint aujourd'hui 18 euros

EVOLUTION DU NOMBRE DE MÉDECINS

Pour tenter de limiter l'augmentation des dépenses de santé, les autorités sanitaires ont voulu réduire le nombre de médecins. On est ainsi passé progressivement de 8 500 médecins formés en 1975 à 3 500 en 1995. En raison d'une pénurie qui devenait de plus en plus évidente, la courbe s'est inversée au cours des années 2000. Aujourd'hui, on atteint 7 500 médecins formés par an, sachant que la

population française est passée de 58 millions en 1970 à 65 millions en 2010. La pente de la courbe indiquant la diminution du nombre de médecins n'a pas été modifiée au fil des changements de gouvernements.



sation des services publics. Ainsi, malgré la pénurie de médecins, la liberté d'installation pour les médecins en secteur 2 à honoraire (libres / 70 pour cent des spécialistes) a été maintenue. La seule limite fixée aux dépassements d'honoraires a été celle « du tact et de la mesure » !

Les dangers d'une privatisation rampante

Ces dépassements d'honoraires atteignent officiellement 2,5 milliards par an pour un total de 18 milliards versés par la Sécurité sociale. Le taux moyen de remboursement par la Sécurité sociale a régulièrement décliné de 80 pour cent dans les années 1980, à 77 pour cent en 2004 et 74,5 pour cent en 2010. Durant ces cinq dernières années, la diminution annuelle du taux de remboursement a été deux fois plus importante que lors des 20 précédentes années. Ce remboursement de 74,5 pour cent recouvre deux réalités : le maintien d'un taux heureux en matière de prise en charge des maladies atteintes d'affections de longue durée ou hospitalisées et à l'inverse un taux très faible (inférieur à 55 pour cent) de la prise en charge des soins courants, en particulier dentaires et d'optique.

On assiste en conséquence à une augmentation des primes des mutuelles et des assurances privées de cinq à sept pour cent par an. Leur rôle ne cesse de croître alors qu'elles sont moins performantes que la Sécurité sociale : leurs frais de gestion sont compris entre 15 et 25 pour cent de leur chiffre d'affaires quand ils sont de moins de cinq pour cent pour la Sécurité sociale (notamment en raison des dépenses publicitaires qu'elles doivent consentir pour attirer des clients et des dividendes versés aux actionnaires dans le cas des assurances privées). Le choix d'une régulation par les mécanismes de marché s'est traduit dans la loi H. St. H. de la Rochelle par la suppression pure et simple du service public hospitalier remplacé par des « établissements de santé de statuts variables ».

Dans cette loi, les missions de service public ont été découpées en tranches et peuvent désormais être vendues « à la découpe » aux divers établissements, y compris commerciaux. C'est ainsi que, pour la première fois, des cliniques commerciales accueillent des internes en formation, en particulier en chirurgie, en gynécologie

(environ six fois plus). De même, en 2004, les franchises médicales ont été instaurées (la franchise est le montant restant à la charge du patient après remboursement). Limitées au début, elles ont ensuite été étendues. Ce fut même le seul débat sur la santé lors des dernières élections présidentielles. Selon le candidat Nicolas Sarkozy, il s'agissait de « responsabiliser les patients ». Depuis, l'Institut de recherche et documentation en économie de la santé, l'IRDES, a publié les résultats d'une étude visant à évaluer les effets des franchises médicales sur la consommation des soins. Le constat est sans appel : ces franchises n'ont pas entraîné de responsabilisation des patients, elles ont seulement aggravé l'inégalité de recours aux soins au détriment des personnes ayant de faibles revenus, mais ne bénéficiant ni de la CMU ni d'une assurance complémentaire.

La régulation a surtout porté sur l'hôpital public qui représente aujourd'hui 33 pour cent des dépenses (les cliniques commerciales représentent 11 pour cent). La première mesure fut l'instauration de la dotation hospitalière en 1983. Chaque hôpital recevait un budget global, ce qui devait l'obliger à optimiser ses dépenses. Mais l'augmentation de l'activité, d'une part, et l'envol du coût des nouveaux traitements, d'autre part, firent apparaître des inégalités flagrantes entre les hôpitaux bien dotés et ceux qui disposaient d'un budget insuffisant.

Certains hôpitaux ayant épuisé leur budget au mois de novembre en étaient réduits à conseiller aux patients d'aller consulter dans les cliniques commerciales qui n'étaient pas soumises à la contrainte d'un budget global. Un temps, le directeur des hôpitaux avait mis en place

un Programme de médicalisation des systèmes d'information, afin de disposer de données médico-économiques permettant d'évaluer grossièrement l'activité de chaque établissement et de faire évoluer leurs dotations en conséquence.

Ainsi s'orientait-on vers une régulation prudente, négociée et intelligente du financement des hôpitaux publics et privés participant au service public hospitalier. Mais les années 2000 ont représenté une rupture libérale avec cette politique. Le Programme de médicalisation des systèmes d'information a été transformé en une tarification à l'activité, dite T2A, suivant le modèle anglo-saxon. Dans ce cadre, les ressources allouées aux établissements de santé publics et privés dépendent de leur activité. Une tarification spécifique est attribuée à chaque pathologie et à chaque acte, ce qui n'a de sens que pour les actes standardisés, tels qu'une dialyse, la pose d'un prothésier ou celle d'une prothèse. En revanche, dès que la prise en charge doit être personnalisée, la codification se révèle inadaptable. Il a donc fallu rendre la codification des actes de plus en plus complexe et en assouplir le contrôle. On a assisté à la dérive bureaucratique d'un système qui se voulait simple, mais qui est inadapté aux maladies graves, aux urgences, aux pathologies chroniques, notamment psychiatriques, et qui de plus a une logique inflationniste (tout comme le paiement à l'acte des médecins libéraux).

Depuis dix ans, seule la régulation par les mécanismes de marché est appliquée, malgré son échec patent. En la matière, la France n'a pas innové. Elle n'a fait que suivre l'ensemble des pays développés, convertis aux bienfaits de la concurrence généralisée et à la nécessité de la privati-

obstétrique. Or, dans des structures privées à but lucratif, les internes, par essence moins efficaces que les médecins titulaires, deviennent des spectateurs des praticiens, mais n'acquiescent pas la formation pratique que leur prodigie l'hôpital public. En revanche, cette formation permet aux cliniques commerciales de tester et de recruter ceux qu'elles jugent les plus prometteurs.

De surcroît, l'hôpital est chargé de diverses missions de service public, telles que les soins aux détenus, les urgences, les greffes, l'éducation thérapeutique (apprendre aux patients à se soigner), la permanence d'accès aux soins, que n'assurent pas les cliniques commerciales. Or la dotation destinée à ces missions a, elle aussi, été limitée (elle représente actuellement environ 15 pour cent des ressources hospitalières). Qui plus est, elle sert de volant de régulation des dépenses de santé à l'échelle nationale.

C'est ainsi qu'en 2011, près de 190 millions destinés au financement des missions de service public ont été gelés, l'État transférant de la sorte une part de son déficit aux hôpitaux publics. Cela a eu pour conséquence que la proportion d'hôpitaux en déficit est passée de 32 pour cent en 2009 à 41 pour cent en 2010. L'idéal promu par le président de la République est désormais le partenariat entre le public et le privé, bien que le dernier rapport de la Cour des comptes ait dénoncé le fait que ce partenariat est le plus souvent asymétrique, nettement en faveur du secteur à but lucratif.

Enfin, la gestion a été remplacée par «la nouvelle gouvernance». La recherche de l'efficacité, c'est-à-dire du juste soin au moindre coût, a cédé la place à la quête de la rentabilité. À la spécialisation et à la stabilité de professionnels, on a substitué la polyvalence et la mobilité au détriment des conditions de travail et de la qualité des soins. Il s'ensuit, chez les professionnels de santé, une insatisfaction qui nuit à leur nécessaire sérénité.

La conjonction de ces multiples facteurs, qui agissent tous dans le même sens, menace l'accès aux soins et leur qualité. Elle soumet une grande partie du personnel de santé à des contraintes peu compatibles avec un travail performant et oblige de nombreux médecins à devenir des gestionnaires, profession qui n'est pas celle pour laquelle ils ont prêté le serment d'Hippocrate. Ce bilan est globalement admis par tous les acteurs de la santé. Que faire pour éviter une telle situation ?

proposons un pacte pour une santé égalitaire et solidaire où le financement des soins serait garanti, tout en permettant de moderniser le système de santé.

Comment sortir de l'impasse ?

D'abord, il paraît urgent de mettre un coup d'arrêt à la privatisation rampante de notre système de santé, qui consiste notamment à transférer les activités jugées «solvables» prises en charge par la Sécurité sociale vers les assurances privées et les mutuelles. Ces activités sont celles dites du petit risque, par exemple l'opération de la cataracte ou une fracture simple. Soulignons que les mutuelles jouent ici un rôle ambigu : elles maintiennent leur attachement à la Sécurité sociale solidaire, mais ont été contraintes d'accepter en 2004 une association avec les assurances privées lucratives.

De là, nous préconisons le retour au taux originel de remboursement par la Sécurité sociale de 80 pour cent pour les soins et les produits de santé courants, en maintenant la prise en charge des dépenses de santé à 100 pour cent (des tarifs conventionnés) pour les bénéficiaires de la couverture médicale universelle et pour les patients souffrant d'affections de longue durée. Nous nous opposons à la mise en place d'un «bouclier sanitaire», qui remettrait en cause le principe même de la Sécurité sociale. Proposé par Martin Hirsch, ce dispositif vise à remplacer la prise en charge à 100 pour cent pour les affections de longue durée, jugée trop coûteuse et injuste, par une franchise généralisée modulée en fonction des revenus. Cela reviendrait, au nom de l'équité, à opérer un nouveau transfert vers les assurances complémentaires, qui imitent

LES AUTEURS



André GRIMALDI est professeur d'endocrinologie, ancien chef du Service de diabétologie de l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris.

Olivier LYON-CAEN, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, est neurologue à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière.

OÙ SE SITUE LA FRANCE ?

La France consacre 11,7 % de son produit intérieur brut, le PIB, à ses dépenses de santé. Ce faisant, elle se classe troisième, derrière les États-Unis (16,2 %) et la Belgique (11,8 %), mais devant l'Allemagne et la Suisse qui consacrent chacune 11,3 % et la Suède 9,9 %. Toutefois, si l'on considère la dépense de santé par habitant, la France se situe en dixième position (avec 2 983 euros), après les États-Unis (5 678), la Suisse (3 858), la Norvège (4 149), le Luxembourg (3 628), le Danemark (3 261), l'Allemagne (3 163), notamment (d'après les comptes nationaux de la

santé de l'Organisation mondiale de la santé). Quant au nombre d'établissements hospitaliers (publics, privés lucratifs et privés non lucratifs), il est passé en France de 2 877 en 2006 à 1 811 en 2011... Enfin, on évalue à 13,7 le nombre de lits hospitaliers pour 1 000 habitants au Japon, 8,2 en Allemagne, 6,6 en France et 2,8 en Suède, pour une moyenne des pays de l'OCDE de 4,9. Quant aux soins aigus, le Japon enregistre 1 000 lits pour 1 000 habitants, l'Allemagne 5,7, la France 3,6 et la Suède 2,1, pour une moyenne des pays de l'OCDE de 3,2 (données de l'OCDE 2009).

par devenir « principales » pour beaucoup d'assurés, la solidarité serait réservée aux plus pauvres. Et une solidarité pour les pauvres se transforme très vite en solidarité au rabais !

Le retour à un taux de remboursement élevé supprimant franchises et forfaits que nous proposons coûterait environ huit milliards d'euros, ce qui est financièrement possible dans le cadre d'une négociation avec les assurances complémentaires. Aujourd'hui, pour 94 pour cent de la population, ces dernières prennent déjà en charge ces dépenses, mais avec un financement moins solidaire, car, contrairement aux cotisations sociales, leurs primes sont généralement indépendantes des revenus.

Des économies possibles

De surcroît, c'est un point sur lequel nous insistons, l'équilibre des comptes de la Sécurité sociale suppose une révision de la liste des soins financés par la solidarité. Tous les soins devraient subir une double évaluation, où l'on établirait le rapport entre les bénéfices du traitement proposé et les risques qui y sont liés pour le patient, et le rapport du coût que représente la prise en charge du malade pour la société et les bénéfices qu'elle en tire. Il est indispensable qu'un médicament, un acte, une prestation ne soient remboursés que si, et seulement si, cette évaluation est jugée positive. Le remboursement partiel actuel de médicaments à 15 pour cent et à 35 pour

cent, du fait qu'il veut à toute force faire jouer une concurrence inappropriée entre les établissements de santé et les professionnels, le gouvernement refuse d'y recourir pour les industriels du médicament et ceux des dispositifs médicaux. Ainsi les génériques coûtent deux fois plus cher en France qu'en Angleterre (cela représente une dépense de un milliard d'euros de plus chaque année pour la Sécurité sociale) et trois fois plus cher qu'aux Pays-Bas. En France, les prix des médicaments sont administrés, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas régulés par la concurrence.

De même, on comprend mal pourquoi la Sécurité sociale accepte de financer indirectement les trois milliards d'euros par an dépensés par l'industrie pharmaceutique pour la publicité auprès du corps médical. Le coût de cette publicité est répercuté sur le prix de vente des médicaments. Nous proposons que, pour chaque euro de publicité dépensé, l'industrie soit taxée d'un euro versé à une agence indépendante gérant la formation continue des professionnels de santé. On estime, d'après plusieurs rapports, que le taux de prescriptions et d'actes médicaux injustifiés est d'environ 25 pour cent. La réduction des gaspillages en matière de santé n'est pas seulement un devoir économique, c'est aussi une exigence éthique.

Tout en réduisant les dépenses, il convient d'élargir les recettes de la Sécurité sociale. Plutôt que de recourir à une TVA dite « sociale » pour le moins controversée, nous proposons d'élargir l'as-

surter toute constitution d'une dette renvoyée sur les générations futures au titre de l'assurance maladie.

Généraliser le système appliqué en Alsace-Moselle ?

Le mode de financement que nous proposons est-il déraisonnable ? Non, puisqu'il est en grande partie celui du système spécifique Alsace-Moselle qui assure un remboursement à près de 90 pour cent pour les assurés au prix d'une cotisation assurance maladie un peu plus élevée que le régime général (1,5 pour cent contre 0,75 pour cent du salaire). Ce système a confirmé son efficacité en étant bénéficiaire en 2010 et en 2011, ce qui lui a permis une réduction du taux de cotisations ! Qu'est-ce qui empêche de généraliser le système Alsace-Moselle à l'ensemble du pays ?

Nous proposons aussi de revoir le mode de financement des hôpitaux en remplaçant la tarification à l'acte par un financement mixte associant la T2A pour des actes techniques programmés dont on peut évaluer le coût avec peu de variabilité d'une maladie à l'autre, et une dotation pour un certain nombre d'activités nécessitant une personnalisation de la prise en charge et, dès lors, trop complexe pour être soumise à la T2A (par exemple, les affections chroniques). On a voulu instaurer des tarifs communs pour le public et le privé, ce qui représente une concurrence déloyale pour l'hôpital public. Cette convergence tarifaire devrait prendre en compte le statut, les missions, la taille de l'établissement, le contexte immobilier ainsi que les populations prises en charge. C'est indispensable pour que l'on puisse comparer ce qui est comparable.

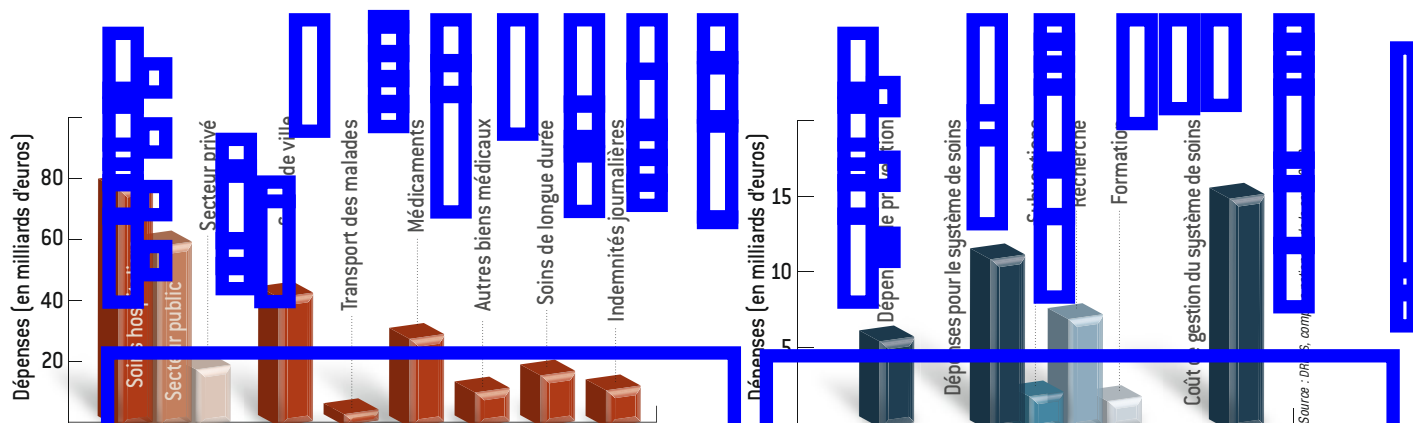
Comment résoudre la question des inégalités sociales d'accès aux soins ? Comment garantir une répartition homogène sur le territoire français des médecins et centres de soins ? Pour y parvenir, cela suppose de mettre en œuvre une politique pragmatique et volontariste poursuivie dans la durée. Elle nécessite la limitation de l'installation en secteur 2 (avec dépassements honoraires) par territoire et par spécialité tout en maintenant la liberté de choix d'installation en secteur 1 (tarif opposable), sachant que les « déserts médicaux » n'existent pas seulement dans certaines régions, mais aussi dans certaines zones

LA RÉDUCTION DES GASPILLAGES

en matière de santé n'est pas seulement un devoir économique, c'est aussi une exigence éthique.

cent devrait de ce fait être supprimé, ainsi que le remboursement des cures thermales (300 millions d'euros) : ou bien l'évaluation est positive et le médicament ou l'acte doit être remboursé à 80 pour cent, ou elle ne l'est pas et il ne doit y avoir aucun remboursement. De même, il n'y a aucune raison de payer plus cher des médicaments ayant une efficacité identique à un médicament déjà présent sur le marché. Lorsqu'un médicament est « génériqué », c'est l'ensemble des tarifs de la classe médicamenteuse qui doit être revu à la baisse, au lieu de prévoir un intéressement financier des médecins, pharmaciens et des pharmaciens qui les proposent.

siette des prélèvements à l'ensemble des revenus et de supprimer la majeure partie des aides sociales représentant actuellement plus de 35 milliards d'euros pour un bénéfice économique douteux régulièrement dénoncé par la Cour des comptes. En 2007, Philippe Seguin avait calculé que la suppression des stock-options aux cotisations sociales aurait rapporté à l'époque trois milliards d'euros à la Sécurité sociale. Nous préconisons également que tout déséquilibre des comptes constaté en fin d'année, malgré les mesures déjà mises en œuvre, entraîne une augmentation automatique et proportionnée des recettes de la Sécurité sociale, pour écar-



DANS LES DÉPENSES DE SANTÉ, les soins et les biens médicaux (à gauche) représentent le poste le plus important : 170,6 milliards d'euros, soit 73 % de la dépense totale de santé (234 milliards d'euros en 2010). Ce poste se décompose en soins hospitaliers (81,2 milliards d'euros – 34,7 % de la dépense totale –, dont environ un tiers dans le secteur privé), soins de ville (44 milliards – 18,8 %), transport des malades (3,8 milliards), médicaments (30,1 milliards – 12,9 %), autres biens médicaux, par exemple les prothèses ou les pansements (11,6 milliards), et les soins

de longue durée (par exemple pour les personnes âgées ou handicapées, 1,3 milliards), et les indemnités journalières (12,5 milliards – 5,3 %). Outre ces dépenses pour les malades, figurent (à droite) les dépenses de prévention (5,9 milliards – 2,5 % de la dépense totale de santé), les dépenses pour le système de soins, ce qui inclut notamment la recherche (3,2 %) et la formation (moins de 1 % seulement !). La part dédiée à la gestion du système (15,9 milliards – 6,8 % de la dépense totale) représente une proportion notable de l'ensemble des dépenses.

ou bassin de vie au sein de régions par ailleurs bien pourvues. Même si elle est limitée à l'installation en secteur 2, cette mesure ne manquera pas de soulever un conflit avec les défenseurs les plus intransigeants de la médecine libérale. Le gouvernement doit être prêt à l'assumer tout en négociant avec les organisations professionnelles une revalorisation du secteur 1, notamment par une réévaluation des tarifs remboursés, une diversification des modes de rémunération mettant fin à l'exclusivité du paiement à l'acte, et la création d'une assurance en responsabilité professionnelle de statut public.

De surcroît, il faudra mettre en place dans les « déserts médicaux » des consultations « avancées » assurées par des médecins hospitaliers et d'autres professionnels de santé : un jeune médecin hospitalier pourrait accepter de se déplacer pour travailler un ou deux jours par semaine dans un centre de santé ou un petit hôpital de proximité éloigné d'une cinquantaine de kilomètres de son hôpital. À plus long terme, il faudra favoriser la répartition des médecins sur le territoire, avec des quotas par spécialité et par région. Les étudiants pourraient passer deux ou trois examens régionaux en compte dans la classe, et pour l'internat en s'engageant à s'installer pendant trois ans dans la région où ils auraient effectué leur internat.

Enfin, l'institution en fin d'études médicales d'un service public de santé d'une durée de deux ans, rémunéré, doit faire l'objet d'un débat portant sur son principe et sur ses modalités, ainsi que sur son rôle

de mise en application. Dans tous les cas, les étudiants devront en être informés avant d'entreprendre des études longues et difficiles. Le début de la mise en place de cette mesure n'est donc pas envisageable avant 2021. Il convient d'adapter en permanence notre système de soins aux progrès de la médecine, à l'évolution des besoins de la population en particulier à son vieillissement, et aux nouvelles conditions de travail des

Adaptation et modernisation du système de santé

La médecine libérale à l'ancienne avec son colloque singulier et son paiement à l'acte reste adaptée à la prise en charge des maladies aiguës bénignes et des traumatismes sans gravité. En revanche, elle est en grande partie inadaptée au traitement des urgences, à la prise en charge des problèmes médico-sociaux des personnes très âgées et au suivi des maladies chroniques. Définir des parcours de soins simplifiés pour les patients avec une répartition des tâches entre établissements, d'une part, et entre professionnels, d'autre part, suppose une cohérence organisationnelle, médicale et financière, alors que notre système de santé est aujourd'hui cloisonné.

Pour justifier la réforme marchande du système de santé, certains « modernistes » expliquent que la médecine devient « industrielle » et que les malades grâce à Internet se transforment en « consommateurs » de

✓ BIBLIOGRAPHIE

- B. Mas et al., *L'hôpital en réanimation*, Éditions du Croquant, 2012.
- A. Grimaldi et al., *Manifeste pour une santé égalitaire et solidaire*, Odile Jacob, 2011.
- A. Grimaldi et al., *Le système de santé français ? Pour ou contre*, Éditions Probéthée, 2010.
- R. Wilkinso, *L'égalité c'est la santé*, Éditions Demopolis, 2010.
- D. Tabuteau, *Dis c'était quoi la Sécu ?*, Éditions de l'Aube, 2009.

✓ SUR LE WEB

<http://www.manifestes.fr>

IL FAUT MEILLEUR RESPECTER SES TRAITEMENTS

Comment faire en sorte que les malades adaptent leurs comportements au jour le jour afin que la maladie évolue le plus favorablement ? Une des conditions nécessaires est que le malade sive correctement le traitement prescrit. On estime qu'un malade sur deux ne respecte le traitement prescrit.

Il s'agit de pathologies graves, telles que le diabète, le sida ou une greffe d'organe. Au point

qu'en 2010, l'Organisation mondiale de la santé estimait que tous les progrès en matière d'observance auraient des conséquences sérieuses à toute nouvelle découverte thérapeutique spécifique. Les maladies chroniques concernent plus de 10 millions de Français et leur nombre ne cesse d'augmenter.

aujourd'hui de 60 pour cent des dépenses de la Sécurité sociale et, selon les prévisions

ce taux atteindra 75 pour cent en 2020. Leur prise en charge nécessite de personnaliser les traitements, d'expliquer au malade et à son entourage les raisons des prescriptions, et de l'aider à adopter de nouveaux comportements en intégrant les projets de soins à ses projets de vie, c'est-à-dire

Nous n'avons pas évoqué la question de la santé mentale. En ce domaine, une nouvelle politique de santé doit être définie avec les professionnels, les représentants des familles et des malades, les spécialistes des sciences humaines et juridiques. Cette politique doit être fondée sur un secteur psychiatrique renoué et financé par une dotation globale.

Une des faiblesses de notre système de santé est son retard en matière de prévention et de sécurité sanitaire. En effet, nous l'avons construit essentiellement comme un système de soins, laissant une place limitée à la prévention comme l'a montré la gestion erratique de l'épidémie de grippe H1N1 en 2009. On a vu à cette occasion la ministre de la Santé entrer en guerre dans ses troupes, c'est-à-dire sans les médecins généralistes et sans les médecins hospitaliers, et chercher à créer de toutes pièces en urgence un système de santé parallèle. De même, l'affaire du *Médiateur* a révélé les carences de notre système de sécurité sanitaire, l'importance des conflits d'intérêts des professionnels, mais aussi des responsables politiques avec l'industrie pharmaceutique.

Cette nouvelle politique de santé passe par le renforcement de la démocratie sanitaire, c'est-à-dire un développement du débat citoyen sur les questions de santé y compris dans leurs dimensions éthiques, comme celles posées par la fin de vie. Elle nécessite le renforcement du rôle et des moyens alloués aux conférences régionales de santé et l'implication des associations de malades et d'usagers du système de santé. Dans l'élaboration, la mise en œuvre et le suivi des programmes de santé.

L'ensemble de cette politique nécessitera l'élaboration d'une nouvelle loi de santé publique définissant les missions et les moyens des quatre services publics de santé : le service public de l'assurance maladie, le service public de l'hospitalisation reposant sur les hôpitaux publics et les établissements privés à but non lucratif, le service public de médecine de proximité essentiellement fondé sur les médecins libéraux installés en secteur 1 et le service public de prévention et de sécurité sanitaire.

Voilà le programme pour qui acceptera de s'en saisir. L'enjeu est « seulement » de sauver un système de santé qui a fait ses preuves, mais n'a pas su ou pu évoluer, et se trouve aujourd'hui à une croisée de chemins. À nous de choisir le bon.

plus en plus éclairés et exigeants. En réalité, un malade reste une personne angoissée et sa navigation sur Internet ne peut qu'accroître sa quête d'un professionnel compétent et à l'écoute pour répondre à sa perplexité et à son angoisse majorées par la multitude des informations recueillies. En effet, plus la quantité d'information disponible augmente, plus la nécessité de recourir à un expert se fait sentir. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'un médecin ne peut plus travailler seul : il doit travailler en équipe en connaissant les limites de ses compétences et en étant capable de recourir à bon escient aux compétences des autres.

Aujourd'hui, la médecine correspond à trois entités différentes : celle des maladies aiguës bénignes ; la médecine des maladies aiguës graves et des gestes techniques complexes nécessitant un regroupement des moyens techniques et humains, une répartition sur l'ensemble du territoire prenant en compte les délais nécessaires à la prise en charge (six heures pour arriver dans un centre de cardiologie interventionnelle afin d'éviter un infarctus du myocarde, trois heures pour être admis dans une unité de neurologie vasculaire afin d'éviter l'hémiplégie). Enfin, troisième entité, la médecine des maladies chroniques.

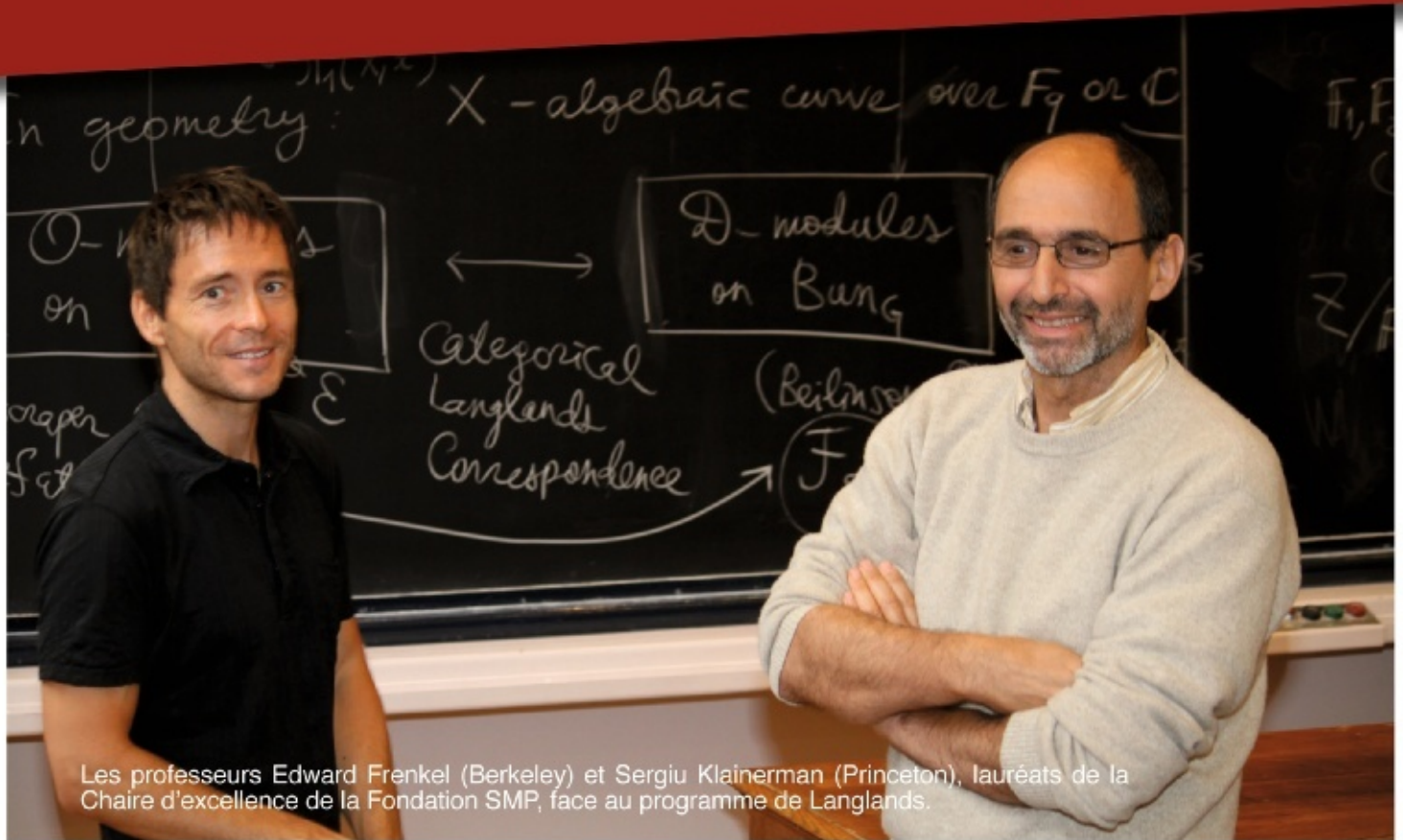
Leur prise en charge doit répondre à trois exigences : l'ajustement des traitements à chaque individu en prenant en compte notamment son âge, les maladies associées, la façon dont la maladie principale évolue, l'efficacité des traitements, les attentes du patient, ses objectifs et ses conditions de vie. L'éducation thérapeutique du patient et la formation du deuxième

des soins. Cette triple approche médicale, pédagogique et psychologique nécessite la collaboration des médecins avec des paramédicaux, en particulier des infirmières cliniciennes spécialisées, mais aussi des diététiciens, des psychologues, des kinésithérapeutes, des moniteurs d'activité physique, des acteurs sociaux et à chaque fois que cela est nécessaire des professionnels assurant la coordination des soins. Cela suppose une réforme du mode de rémunération des médecins généralistes instituant, à côté du paiement à l'acte un financement par forfait, par vacation ou par salaire, ainsi que le développement de centres de santé et de maisons médicales sans dépassements d'honoraires.

Vers une éthique du juste soin au moindre coût

De même, la formation médicale doit être revue afin d'assurer, à côté de la formation biomédicale, une formation en pédagogie, en communication et en psychologie. Il faut diversifier les voies d'admission aux études médicales à partir des différentes filières universitaires, des sciences dites dures aux sciences humaines et aux lettres. Une formation initiale à la fois pratique et théorique doit comporter des stages hospitaliers à temps plein (et non à mi-temps comme aujourd'hui), ainsi que des stages auprès des médecins généralistes, notamment dans les centres de santé et les maisons médicales. Elle doit permettre aux étudiants d'apprendre la prise en charge globale empathique des patients, la justification des prescriptions, l'éthique du juste soin au moindre coût et le travail d'équipe.

Accélérez la recherche scientifique...



Les professeurs Edward Frenkel (Berkeley) et Sergiu Klainerman (Princeton), lauréats de la Chaire d'excellence de la Fondation SMP, face au programme de Langlands.

De nombreux domaines de recherche ont besoin des mathématiques pour progresser, par exemple :

- ◆ la connaissance du cerveau humain
- ◆ la sécurité informatique
- ◆ la prédiction climatique et météorologique
- ◆ la simulation de catastrophes naturelles

Soutenez la Fondation Sciences Mathématiques de Paris

Madame, Monsieur,

Avez-vous déjà imaginé à quoi ressemblerait notre monde moderne sans l'apport des mathématiques ?

Sans mathématiques, des découvertes aussi universelles que l'Internet, le séquençage du génome, le GPS ou l'imagerie médicale n'auraient tout simplement pas vu le jour.

Les mathématiques sont omniprésentes dans notre quotidien. Elles constituent un facteur essentiel de progrès, **façonnant notre futur et celui de notre société**. Elles font aussi partie du **bagage indispensable à tout citoyen** responsable et doté d'esprit critique.

L'école mathématique française est la meilleure au monde. Le nombre de ses chercheurs ayant reçu les plus hautes distinctions l'atteste. Cet héritage de Descartes, de Pascal ou de Poincaré est un atout extraordinaire pour la France, pour sa capacité d'innovation et son rayonnement international.

Notre mission, à la Fondation, est de réussir à faire fructifier ce capital en formant les élites mathématiques de demain. **Depuis notre lancement, en 2007, plus de 200 chercheurs et étudiants ont déjà bénéficié de notre aide.**

Aujourd'hui, la recherche mathématique se construit par des collaborations internationales. Grâce à nos programmes, nous attirons les étudiants étrangers les plus brillants dans nos universités et nos laboratoires. Nous accompagnons également les étudiants français au sein de nos universités et lorsqu'ils partent compléter leur formation à l'étranger. **Et nous voulons continuer, avec vous !**

À titre d'exemple, une bourse de Master coûte en moyenne 10 000 € par an. **20 dons de 500 € permettent de soutenir un nouvel étudiant !** Bien sûr, chaque don sera utile, quel qu'en soit le montant.

Je vous remercie de vous engager avec nous !



Jean Dolbeault, Directeur de recherche CNRS
Directeur de la Fondation Sciences Mathématiques de Paris

PS : J'invite ceux d'entre vous qui auraient le souhait et la possibilité de s'impliquer sur des projets particuliers et des montants plus conséquents à prendre contact avec mon secrétariat pour convenir d'un rendez-vous (téléphone et courriel en p.4 de ce dépliant).

La Fondation Sciences Mathématiques de Paris en bref :

- ♦ **La plus grande communauté mathématique mondiale,**
- ♦ **Plus de 1 200 chercheurs** (dont 4 médaillés Fields, 16 académiciens et plus de 200 lauréats de prix nationaux et internationaux), **et 600 doctorants,**
- ♦ **Toutes les mathématiques, des plus pures aux plus appliquées,**
- ♦ **Une mise en réseau** d'hommes, de laboratoires, d'universités et de moyens financiers unique et novatrice en France et dans le monde.

« Je m'appelle Alexandra, j'ai 21 ans, je viens du Portugal, de l'Université de Porto. Grâce au programme PGSM de la Fondation Sciences Mathématiques de Paris, j'ai pu élargir mes horizons en maths, et aussi en tant que personne. Je me suis inscrite en Master 1 à l'Université Pierre et Marie Curie. J'y ai trouvé dès mon arrivée une ambiance propice à l'excellence. Et Paris est une ville merveilleuse. C'est aussi ici que j'ai fait la connaissance de Roxana (venue de Roumanie), une autre boursière de ce programme. En discutant, nous nous sommes aperçu que nous avions des intérêts similaires. Pourquoi ne pas faire un projet ensemble ? Grâce à la Fondation, nous avons eu la possibilité de le mettre en œuvre... »



Alexandra Santos, étudiante



« Je pense que ma venue à Paris m'a beaucoup apporté. Je me suis bien intégrée au système d'enseignement français et habituée à ses exigences. Maintenant, je suis convaincue qu'avec de la persévérance et du sérieux, je vais réussir à accomplir tous ce que je veux réaliser d'un point de vue scientifique, parce que j'ai trouvé ici un soutien pertinent et un cadre stimulant. Le rôle de la Fondation est très important : elle nous offre non seulement un soutien financier, ce qui est essentiel, mais nous aide aussi dans notre orientation scientifique... »

Roxana Larisa Dumitrescu, étudiante

« Je suis doctorant au laboratoire de Probabilités et Modèles Aléatoires et je travaille sur des processus appelés *coalescents échangeables*. Ces processus permettent d'étudier la généalogie de certaines populations aléatoires. Grâce au soutien de la Fondation des Sciences Mathématiques de Paris, j'ai pu intégrer le Statistical Laboratory de l'université de Cambridge pour y continuer ma thèse pendant cinq mois. J'ai pu y rencontrer un spécialiste de la théorie des coalescents, assister aux séminaires du laboratoire et exposer mes travaux auprès des autres chercheurs. Mathématiquement, l'apport du séjour est indéniable. L'immersion dans un laboratoire étranger a donné une nouvelle perspective à ma vision de la recherche. Les discussions informelles avec les professeurs et les doctorants m'auront certainement apporté beaucoup de choses. Il est encore trop tôt pour le dire, mais certaines rencontres déboucheront, je l'espère, sur des collaborations futures... »



Clément Foucart, doctorant



« Je remercie sincèrement la Fondation Sciences Mathématiques de Paris. Quand j'ai appris que j'avais reçu le Prix de la Fondation, je n'ai pas tout de suite mesuré l'impact que cela aurait. C'est sur place que j'ai compris tous les avantages que j'en retirerais. Les conditions de travail qui me sont offertes sont remarquables. Cela fait du bien de pouvoir souffler et se consacrer plus exclusivement à sa recherche. C'est une année vraiment exceptionnelle pour moi. En qualité de lauréat, je donne aussi un cours au Collège de France. Je suis très honoré de pouvoir le faire dans ce haut lieu des mathématiques. »

Ivan Nourdin, chercheur

BULLETIN DE SOUTIEN

à l'excellence mathématique française

Nom : Prénom :

Adresse :
.....
.....

Oui, je m'engage aux côtés de la Fondation Sciences Mathématiques de Paris en lui adressant un don par chèque à l'ordre de la Fondation Sciences Mathématiques de Paris (à envoyer à l'adresse ci-dessous) d'un montant de ☐ 30€ ☐ 100€ ☐ 200 € ☐ 500 € ☐ 1 000 €
☐ autre montant :

déductible ☐ de mon impôt sur le revenu (à hauteur de 66% du montant du don, dans la limite de 20% du revenu imposable : ainsi un don de 100 € me revient à 34 € après déduction fiscale).
☐ de mon ISF (à hauteur de 75% du montant du don : un don de 100 € me revient à 25 €).

Je recevrai mon reçu fiscal par retour de courrier.

Autres modes de don sur le site : www.sciencesmaths-paris.fr



Merci de votre soutien aux chercheurs et aux étudiants. Il contribue à faire rayonner l'école mathématique française.

Fondation Sciences Mathématiques de Paris

Institut Henri Poincaré - 11 rue Pierre et Marie Curie - 75005 Paris

Tél. : (+33) 1 44 27 68 03 - Fax : (+33) 1 44 27 68 04 - Email : contact@fsmf.fr

Site Internet : www.sciencesmaths-paris.fr

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE

et sur www.pourlascience.fr/editionsnumeriques



Dossier Pour la Science n° 74

Les mathématiques ont leurs sept merveilles ! Il s'agit des sept problèmes du millénaire, mis à prix à un million de dollars chacun par l'Institut Clay de mathématiques en 2000. Mais l'intelligence des mathématiciens est aussi mise à l'épreuve par bien d'autres problèmes, tels ceux de Hilbert. Découvrez dans ce numéro comment ces énigmes orientent l'avenir de la discipline ouvrant la voie à de nouvelles connaissances fondamentales.

Parution de janvier / mars 2012 – Prix : 6,95 €

Cerveau & Psycho n° 50 – Nouvelle formule !

Un panorama de la santé mentale en Europe. Les promesses de la psychiatrie personnalisée. Le portrait psychologique du candidat « idéal » à la présidentielle. Le décryptage psychologique du film « Intouchables »... Et pour fêter sa nouvelle formule, Cerveau & Psycho vous invite à jouer au Grand Quiz : « Êtes-vous incollable sur le cerveau ? » sur www.cerveauetpsycho.fr/grandquiz

À la clé, 50 lots à gagner !

Parution de mars / avril 2012 – Prix : 6,95 €



L'Essentiel Cerveau & Psycho n° 9

L'intelligence est une propriété de l'esprit « évidente », mais qui résiste à toute définition simple. De nombreux gènes participent aux capacités cérébrales et cognitives. Mais l'environnement a une importance notable : l'entraînement, la motivation, un milieu stimulant sont autant de facteurs qui font progresser l'intelligence. Un numéro indispensable pour comprendre les multiples facettes de l'intelligence et apprendre à la cultiver !

Parution de février / avril 2012 – Prix : 6,95 €

Format classique ou pocket

Format classique ou pocket

POUR LA
SCIENCE

En route vers MARS

Damon Landau et Nathan Strange

Le programme spatial habité pourrait s'inspirer de l'exploration planétaire robotisée pour transporter des astronautes vers des astéroïdes, puis vers Mars, rapidement et à faible coût.

L'ESSENTIEL

✓ Malgré une baisse des moyens, la NASA est censée revenir à ce qu'elle fait le mieux : aller là où personne n'est allé auparavant.

✓ Les ingénieurs doivent concevoir des missions à options, qui peuvent être revues à la hausse ou à la baisse en fonction de la conjoncture politique et économique.

✓ Avec des vaisseaux à propulsion ionique, on peut concevoir des missions de plus en plus complexes : vers l'orbite lunaire, puis sur des astéroïdes et enfin en direction de Mars.

En octobre 2009, un petit groupe de spécialistes de l'exploration spatiale robotisée, dont nous faisons partie, a décidé de s'aventurer hors des sentiers battus et d'imaginer différentes approches pour envoyer des hommes dans l'espace. Cette initiative était motivée par les conclusions de la commission Augustine, un comité d'experts mis en place par le président Barack Obama pour faire le pont sur la navette spatiale et les projets à venir. La commission avait conclu que le programme américain de vols habités était dans une impasse. Nous avons voulu déterminer si le programme d'exploration robotisée, allant de Mercure aux confins du Système solaire, pouvait apporter des solutions techniques à certains des défis politiques et budgétaires auxquels la NASA était confrontée.

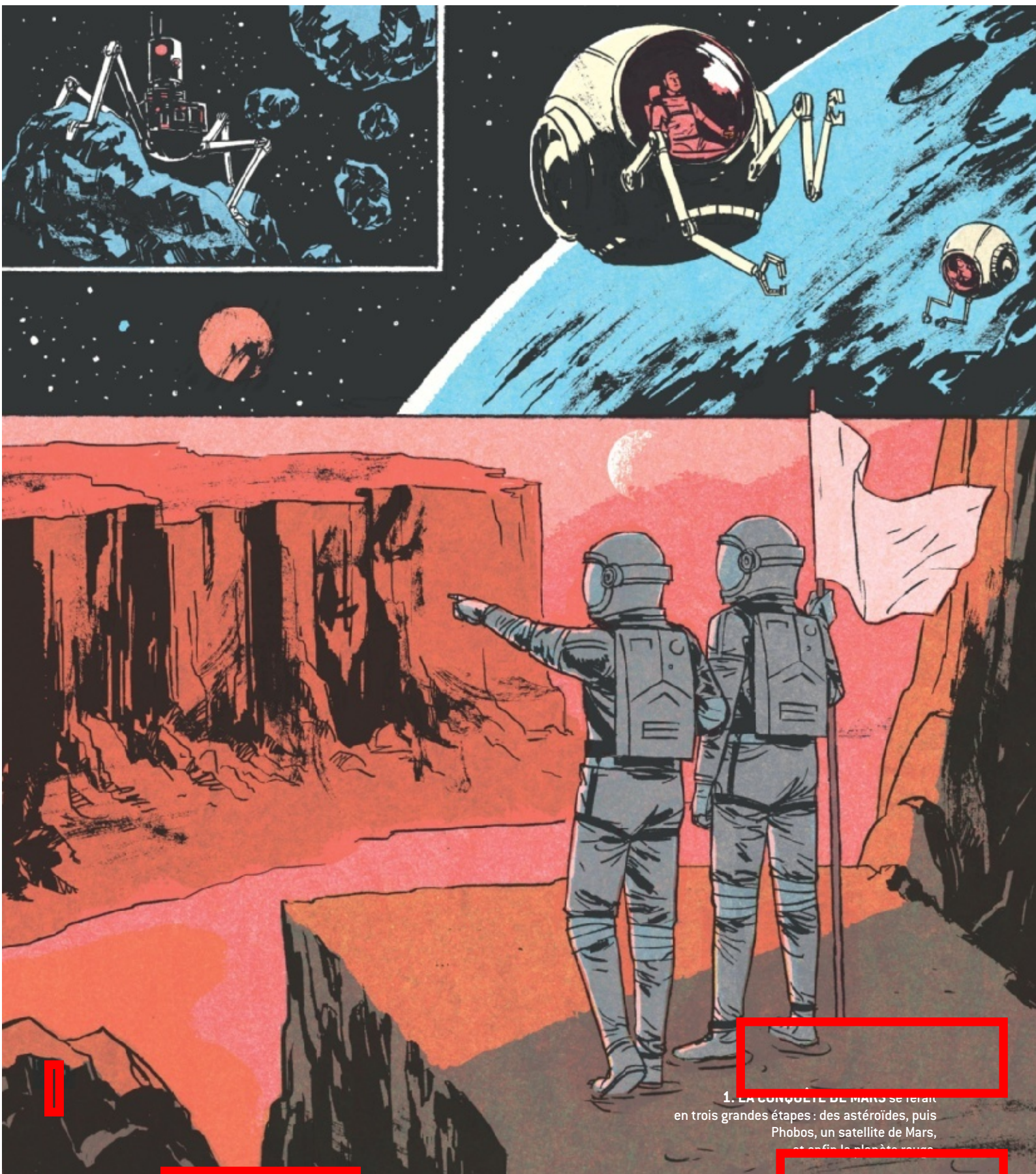
Nous avons imaginé utiliser des moteurs ioniques pour acheminer les composantes d'une base lunaire ; fournir de l'énergie à distance aux rovers, des véhicules robotisés envoyés sur la lune martienne Phobos ; placer à l'avance des fusées d'appoint chimiques le long d'une trajectoire interplanétaire, afin que les astronautes

les récupèrent en chemin ; remplacer les combinaisons spatiales par des capsules d'exploration similaires à celles du film 2001, *l'Odyssée de l'espace*. Par exemple, nous avons calculé que la propulsion électrique (par un moteur ionique ou des technologies apparentées) réduirait considérablement la masse du vaisseau pour les missions habitées vers des astéroïdes et vers Mars.

C'était comme un retour à l'effervescence qui régnait à la NASA dans les années 1960, la fumée de cigarette en moins. Pendant six mois, nous avons rencontré des ingénieurs et des scientifiques qui s'intéressaient à notre approche, et nous nous sommes renseignés sur les expériences conduites par la NASA : des essais de moteurs électriques aux panneaux solaires légers à haut rendement.

Nous avons combiné les propositions les plus prometteuses avec des stratégies éprouvées pour développer un projet visant à envoyer dès 2024 des astronautes sur un astéroïde.

Cette approche, qui a dû s'adapter aux contraintes budgétaires de la NASA, découpe la tâche globale en une série d'étapes de



1. LA CONQUÊTE DE MARS se fera en trois grandes étapes : des astéroïdes, puis Phobos, un satellite de Mars, et enfin la planète rouge.

LES AUTEURS



Damon LANDAU et Nathan STRANGE travaillent au Jet Propulsion Laboratory pour la NASA.

✓ BIBLIOGRAPHIE

D. Landau et N. Strange, Near-Earth asteroids accessible to human exploration with high-power electric propulsion. Conférence des spécialistes en astronautique AAS/AIAA, Girdwood, 2011. <http://tinyurl.com/ElectricPath>

J.-R. Brophy et al., 300-kW solar electric propulsion system configuration for human exploration of near-Earth asteroids. 47^e conférence Joint Propulsion AIAA/ASME/SAE/ASEE, San Diego, 2011. <http://tinyurl.com/300kWSEP>

E. Choueri, L'essor des moteurs à plasma. Pour la Science, n° 379, mai 2009. http://bit.ly/pls379_plasma

complexité croissante: le rythme pourra s'adapter aux financements. Le principal objectif est que le programme habité reste flexible et qu'il s'appuie sur les techniques mises en œuvre dans le programme d'exploration robotique.

Le rapport de la commission Augustine a déclenché une bataille politique féroce, culminant avec la décision de déléguer une bonne partie de la tâche de lancement des astronautes en orbite à des compagnies privées. La NASA peut maintenant se concentrer sur l'innovation. Mais comment avancer sans le soutien politique et les ressources dont elle jouissait pendant les glorieuses années des missions *Apollo*?

L'exploration robotisée suit une approche progressive: on développe un ensemble de techniques qui permettent de préparer les missions de plus en plus ambitieuses. Au lieu de reposer sur une stratégie du « tout ou rien » avec un objectif unique, le programme d'exploration robotisée s'appuie sur des combinaisons innovantes de technologies qui permettront d'atteindre des objectifs variés.

Pour certains, étant donné les bons résultats obtenus avec l'exploration robotisée, nous ne devrions tout simplement pas envoyer d'hommes dans l'espace. Si le seul objectif de la NASA était la découverte scientifique, les sondes robotisées seraient certainement moins chères et moins risquées. Mais telle n'est pas la seule mis-

sion de la NASA: la connaissance n'est qu'un des aspects de la curiosité de l'esprit humain. Si l'exploration spatiale suscite un tel engouement, c'est parce qu'elle apporte sa part de rêve. Les sondes robotisées correspondent à la première phase de l'exploration du Système solaire. Les missions habitées constitueront la deuxième, et la troisième sera celle de l'aventure spatiale que tentent les Terriens en quête d'aventure ou espérant faire fortune quelque part dans le cosmos. Les capsules lancées vers la station spatiale et les vols suborbitaux seront les premiers maillons de cette reconquête spatiale. La NASA doit maintenant développer la technologie dont nous aurons besoin pour aller plus loin.

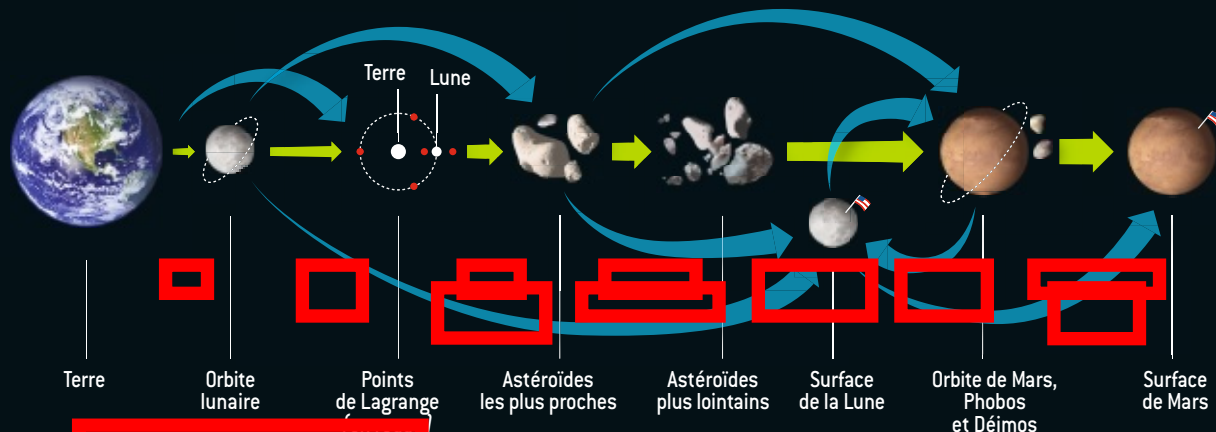
Des missions flexibles avant tout

Nous recommandons trois grands principes. Le premier est celui des « destinations intermédiaires reconfigurables » que la commission Augustine avait suggéré et que le président B. Obama a accepté. Avec cette stratégie, l'itinéraire de la Terre à Mars n'est pas fixé à l'avance, mais divers chemins sont envisageables. Nous commencerions par les destinations proches, tels les points de Lagrange (des endroits où le mouvement des objets est stabilisé par les forces gravitationnelles) et les astéroïdes évoluant à proximité de la Terre. Les

TOUS LES CHEMINS MÈNENT À MARS

Dans le passé, le programme spatial habité américain avait adopté une approche monolithique: il se concentrait sur une cible spécifique, avec un seul système pour s'y rendre. Aujourd'hui, l'approche est différente. L'objectif est de se lancer dans l'espace interplanétaire avec des missions progressivement plus complexes, telles que l'exploration

proposée par les auteurs (flèches vertes) et ses variantes (flèches bleues). La liste des destinations est présentée par ordre de difficulté croissante. Le déroulement des missions et le choix des stratégies pourraient être modifiés si des difficultés techniques surgissent ou si les fonds alloués à la mission sont réduits.



destinations reconfigurables requièrent de nouveaux moyens de transport, notamment la propulsion électrique. Nous proposons les moteurs à effet Hall (un type de moteur ionique) alimentés par des panneaux solaires.

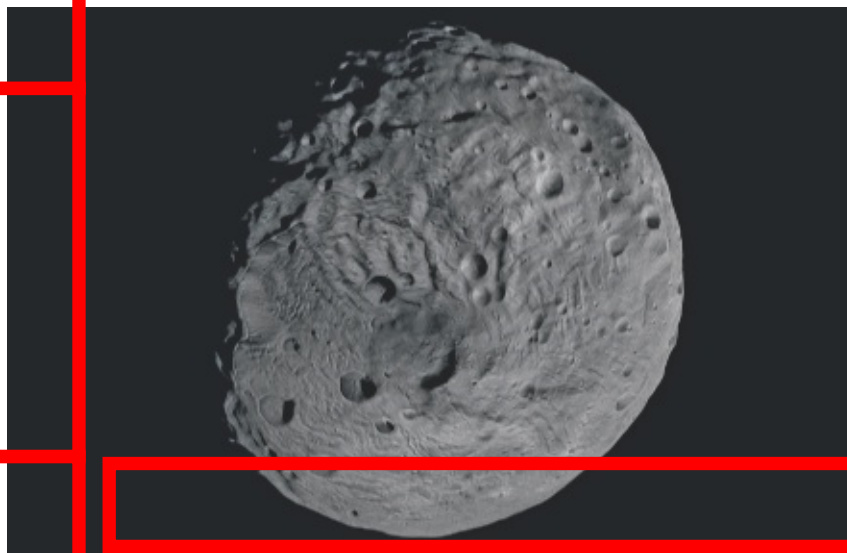
Un système de ce type a propulsé la sonde *Dawn* vers l'astéroïde géant Vesta et la conduira en 2015 jusqu'à la planète Cérés. Là où les moteurs chimiques classiques des fusées produisent une poussée puissante, mais brève, les moteurs électriques éjectent un flux modéré, mais régulier, de gaz. Les systèmes fondés sur l'alimentation électrique ont une consommation de carburant réduite. Cependant, ces moteurs ont une poussée plus faible, ce qui allonge la durée des missions.

On imagine souvent à tort que la propulsion électrique est trop lente pour les missions spatiales habitées, mais on peut éviter cette difficulté. Par exemple, en utilisant des remorqueurs robotisés à propulsion électrique pour placer les fusées chimiques d'appoint en quelques étapes clefs d'une trajectoire; quand le chemin est tracé, les astronautes se mettent en route et récupèrent les fusées d'appoint à mesure qu'ils progressent. Ainsi, les missions bénéficient du rendement énergétique de la propulsion électrique tout en conservant l'avantage de la propulsion chimique en termes de vitesse.

De surcroît, la propulsion électrique permet d'économiser des fonds. Puisque le vaisseau n'a pas besoin de transporter autant d'ergol (mélange de comburant et de combustible), sa masse totale au lancement est réduite de 40 à 60 pour cent. Or le coût des missions spatiales est directement proportionnel à la masse initiale propulsée. Ainsi, diviser la masse par deux réduirait le coût de moitié.

Les astéroïdes : des tremplins vers Mars

Pourquoi vouloir atteindre un astéroïde alors que l'objectif est Mars? Parce qu'il y en a des milliers parsemés entre la Terre et Mars, autant de tremplins vers l'espace lointain. Mais aussi parce que la gravité y est si faible qu'atterrir sur l'un d'eux demande moins d'énergie que pour atteindre la surface de la Lune ou de Mars. Il est difficile de monter une longue expédition interplanétaire (6 à 18 mois), et



UCLA/NPS/DLR/IDA
NASA/JPL-Caltech

2. L'ASTÉROÏDE COMME TREPAIN Cette sonde utilise des moteurs ioniques à très haut rendement, comme cela pourrait être un jour le cas pour les missions interplanétaires habitées.

l'on recherche tous les moyens d'économiser l'énergie et de réduire les difficultés techniques. Par ailleurs, sur Mars, mais aussi sur les astéroïdes, les astronautes seront soumis à l'impesanteur (la pesanteur sur Mars est de l'ordre du tiers de la pesanteur sur Terre) et exposés aux effets des rayonnements de l'espace: si nous réussissons à les protéger contre ces effets délétères sur un astéroïde, nous saurons comment faire sur Mars. Or aujourd'hui, la question reste ouverte. À mesure que la NASA apprendra comment gérer les risques liés à l'exploration de l'espace lointain, elle perfectionnera les véhicules destinés aux missions martiennes.

Plusieurs astéroïdes intéressants pourraient être visités par des astronautes avec des temps de vol allant de six mois à un an et demi en utilisant un système de propulsion électrique de 200 kilowatts, ce qui serait un progrès non négligeable par rapport à nos capacités actuelles; la Station spatiale internationale est dotée de 260 kilowatts produits par des panneaux solaires. Une telle mission franchirait la barrière de l'espace lointain, tout en constituant une étape essentielle vers les temps de vol de deux à trois ans et des dispositifs à 600 kilowatts requis pour l'exploration martienne.

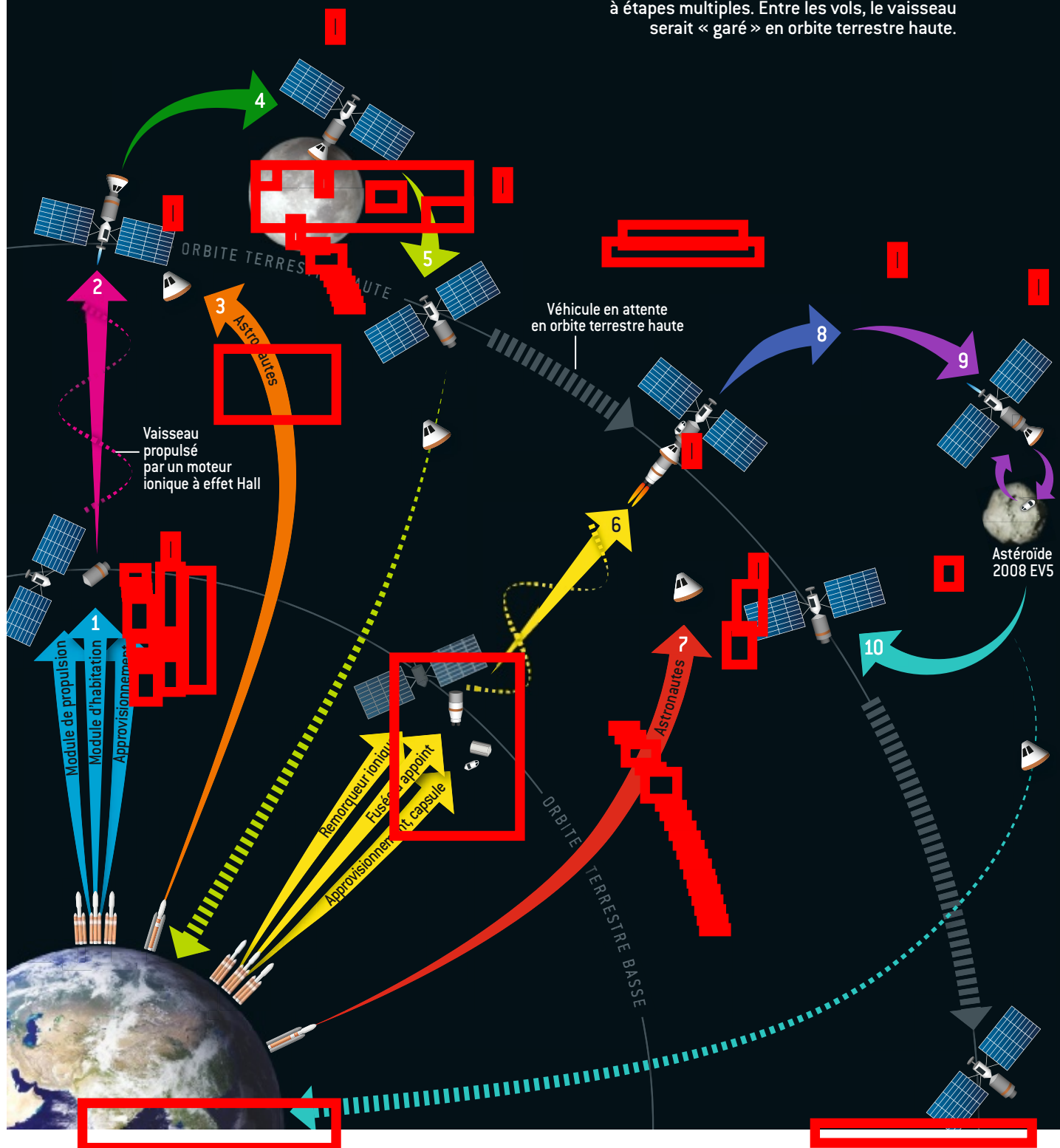
Par ailleurs – c'est le deuxième principe de notre projet –, la NASA ne sera pas obligée d'inventer des systèmes complètement nouveaux comme c'était le cas dans les années 1960. Si certains dispositifs, notamment ceux adaptés à l'impesanteur et ceux qui protègent contre les rayonne-

ments spatiaux, nécessiteront de nouvelles recherches, le reste des équipements dérivera directement de dispositifs existants. Le véhicule spatial sera assemblé en combinant quelques modules spécialisés: la structure, les panneaux solaires et les équipements permettant de vivre dans l'espace dériveront de modèles qui ont déjà été utilisés sur la Station spatiale internationale. De nombreuses agences spatiales étrangères et entreprises privées ont des compétences avérées dans ces domaines, que la NASA pourra mettre à contribution.

Enfin, c'est le troisième principe –, il faudra concevoir un programme qui continuera à aller de l'avant même si une composante rencontre des difficultés ou prend du retard. Ce principe devra être appliqué à la composante la plus controversée de la politique spatiale adoptée par le Congrès américain, la fusée de lancement qui acheminera l'équipage et les véhicules d'exploration. Le Congrès a demandé à la NASA de construire un nouveau lanceur lourd, le SLS (*Space Launch System*). Comme annoncé en septembre 2011, la NASA projette de développer ce véhicule par étapes, en commençant par la moitié environ de la puissance du *Saturn V* d'Apollo, et d'augmenter progressivement la capacité de lancement jusqu'à dépasser celle de *Saturn V*. Le premier lanceur SLS, couplé à la capsule *Orion* en cours de développement, pourra véhiculer les astronautes pour des excursions de trois semaines vers l'orbite lunaire, puis jusqu'à de Lagrange, mais pas plus loin en l'état.

FRANCHIR LA BARRIÈRE DE L'ESPACE PROFOND

Le nouveau programme proposé par les auteurs pour l'exploration interplanétaire met l'accent sur la flexibilité des missions. Plutôt que des vaisseaux à usage unique, tels que les missions *Apollo* vers la Lune, et la plupart des missions interplanétaires antérieures, la NASA et ses partenaires construiraient un véhicule interplanétaire qui pourrait être utilisé plusieurs fois. Il pourrait être prêt à décoller dès 2024. L'assembler, le tester et le lancer serait un processus à étapes multiples. Entre les vols, le vaisseau serait « garé » en orbite terrestre haute.



1 Mise en orbite et assemblage des éléments du vaisseau

Deux modules (le moteur ionique solaire et le module d'habitation) seront lancés séparément en orbite terrestre basse à bord de lanceurs publics ou privés. Les contrôleurs au sol les assembleront à distance comme une station spatiale. Un troisième lanceur assurera l'avitaillement du véhicule pour l'étape suivante.

2 Migration en orbite terrestre haute

Le moteur ionique ne sera pas assez puissant pour que le vaisseau se libère de son orbite terrestre d'un seul coup, mais il le poussera lentement vers une orbite plus éloignée.

À ce stade, les astronautes n'auront pas encore besoin de s'approcher à bord, ce qui leur permettra d'éviter l'irradiation et l'ennui d'un voyage de deux ans.



3 Arrivée des astronautes

Quand le vaisseau aura atteint une orbite haute qui lui permettra d'échapper à la gravité terrestre, les astronautes le rejoindront à bord d'une petite fusée rapide.

4 Mission lunaire

Pour mettre le vaisseau à l'épreuve, les astronautes effectueront une mission lunaire. Ce voyage sera plutôt un vol d'essai, mais il permettra aussi d'accumuler des résultats scientifiques en utilisant une flottille de robots d'exploration.

5 Retour en orbite terrestre haute, et fin de la mission pour les astronautes

Après un vol interplanétaire, les astronautes retourneront en orbite terrestre haute, puis poursuivront leur route vers la Terre. Ils amerriront dans une capsule de type *Apollo*.

6 Ravitaillement du vaisseau

Pour aider le vaisseau à s'échapper de l'orbite terrestre, les contrôleurs au sol enverront une petite fusée d'appoint à l'aide d'un remorqueur interorbital à propulsion ionique.

7 Nouvel équipage d'astronautes

Quand la fusée sera attachée au véhicule interplanétaire, un autre équipage d'astronautes décollera à bord d'une fusée classique.

8 Se libérer de la gravité terrestre

Le véhicule interplanétaire se mettra en orbite elliptique et, au moment où il sera au plus près de la Terre, la fusée d'appoint sera utilisée. Le vrai voyage commencera.

9 Mission vers un astéroïde

Le moteur ionique prendra le relais et poussera lentement le vaisseau vers sa première cible, peut-être l'astéroïde 2008 EV5. Le voyage durera six mois. L'équipage passera un mois à explorer l'astéroïde dans des capsules spatiales.

10 Retour du véhicule en orbite terrestre et des astronautes sur Terre

Le vaisseau allumera son moteur ionique et prendra la direction de la Terre. Six mois plus tard, l'équipage amerrira dans la capsule utilisée pour monter en orbite. Le vaisseau sera piloté à distance et reviendra en orbite terrestre haute.



Heureusement, les voyages vers l'espace lointain pourront commencer avant que le SLS ne soit achevé. Les préparatifs débuteront avec la conception des équipements où vivront les astronautes et des systèmes de propulsion électrique qui seront nécessaires pour voyager au-delà de la Lune. En faisant de ces systèmes une des principales priorités, alors même que les nouveaux lanceurs sont encore en cours de développement, la NASA s'efforcera d'améliorer le SLS afin qu'il soit mieux adapté aux missions lointaines. Ces composantes pourront même être transportées par des lanceurs commerciaux internationaux et être ensuite assemblées en orbite, comme l'ont été la Station spatiale internationale et la station *Mir*. Avec la flexibilité offerte par les diverses options, la NASA pourra intégrer le stage d'exploration dans son budget de plus en plus restreint.

Mission : 2008 EV5

Dans notre projet, la renaissance de la NASA commencera par la construction du véhicule spatial. La version la plus simple comprend deux modules : un moteur ionique à alimentation solaire pour la propulsion, et un nouvel espace habitable. Les modules seront envoyés en orbite terrestre basse par le SLS. Une autre solution sera d'utiliser trois lanceurs commerciaux, deux pour les composants de la navette, et un pour les différentes pièces.

Le voyage inaugural sera... le moins intéressant. Pendant deux ans, le vaisseau, sans équipage et piloté à distance, suivra une lente spirale à partir de l'orbite terrestre basse, traversant les ceintures (intérieure et extérieure) de radiations de Van Allen pour atteindre une orbite terrestre haute, un voyage peu gourmand en ergol, mais trop long et radioactif pour les astronautes. Quand le vaisseau sera en orbite haute, il pourra entreprendre des manœuvres de survol lunaire et se préparer à une nouvelle mission. Les astronautes rejoindront le vaisseau en décollant à bord d'une fusée à propulsion chimique classique.

Pour un vol d'essai, les astronautes placeront le véhicule sur une orbite qui restera presque toujours au-dessus du pôle Sud de la Lune. De là, ils pourront contrôler une flotte de robots d'exploration et étudier la composition d'anciens dépôts de glace dans les cratères du pôle Sud du bassin d'Aitken. Une telle mission offrira

les conditions d'une exploration au long cours, tout en restant à quelques jours de la Terre, ce qui présentera une sécurité évidente. Après le retour de l'équipage sur Terre, le véhicule interplanétaire restera en orbite terrestre haute, en attente d'un ravitaillement et d'une vérification pour sa première mission vers un astéroïde.

Nous avons étudié tout un éventail de missions de ce type. Certaines déposeraient les astronautes sur de petits objets (de moins de 100 mètres de diamètre) juste au-delà de la Lune, et les reconduiraient sur Terre en moins de six mois. D'autres s'aventureraient jusqu'à de gros objets (plus de un kilomètre de diamètre) presque aussi éloignés que Mars et les ramèneraient vers la Terre en deux ans. Se contenter de travailler à une mission plus simple risquerait de limiter les défis et n'apporterait pas d'innovation technique notable. À l'inverse, tout miser sur une mission plus ambitieuse pourrait retarder à jamais toute exploration intéressante en fixant des objectifs hors de portée. Notre

plan se situe entre ces deux extrêmes. Il s'agit d'un voyage aller-retour qui durerait un an avec un lancement en 2024, et où les astronautes passeraient 30 jours à explorer l'astéroïde 2008 EV5. Cet objet, de 400 mètres de diamètre environ, intéresse beaucoup les planétologues : c'est un astéroïde carboné de type C, éventuel vestige de la formation du Système solaire.

Pour échapper à la gravité terrestre, on comblera la propulsion ionique et alimentation chimique. Cette combinaison réduira de 40 pour cent la quantité de carburant nécessaire pour échapper au champ d'attraction gravitationnelle de la Terre par rapport à un système entièrement chimique. Une fois que les astronautes auront quitté l'attraction terrestre, les propulseurs à effet Hall s'allumeront et pousseront le véhicule vers sa destination. Parce que le moteur ionique fournit une poussée continue, il se prête à une utilisation flexible. Les concepteurs de missions pourront développer un ensemble de trajectoires de repli si un dysfonctionnement devait survenir. Ce fut le

cas de la mission robotisée japonaise *Hayabusa*, chargée d'étudier l'astéroïde Itokawa, au cours de laquelle plusieurs défaillances ont été résolues grâce à ses moteurs ioniques. Si des problèmes techniques ou budgétaires nous empêchaient de livrer le véhicule interplanétaire à temps pour atteindre l'astéroïde 2008 EV5, nous pourrions choisir une autre cible. Si nous rencontrons des difficultés, nous nous adapterons. Par exemple, si les carburants très performants sont trop difficiles à stocker dans l'espace lointain, nous passerons à des carburants moins efficaces et ajusterons la mission.

Dans notre projet, les astronautes auront un mois pour explorer l'astéroïde. Des casques d'exploration, inspirés des bathyscaques, pourraient remplacer les combinaisons spatiales, qui sont encombrantes et rendent pénibles les sorties dans l'espace. Une capsule avec des bras de manipulation robotisés réduit non seulement les difficultés, mais offre aussi un habitacle pour manger et se reposer. Dans une capsule, un astronaute se déplace-

Quelle propulsion pour une mission martienne ?

Le CNES étudie depuis plusieurs années les nombreux scénarios pour propulser une mission martienne habitée. Nos études confirment que pour envoyer six astronautes en s'appuyant uniquement sur la propulsion chimique classique, il faudrait lancer plus de 1 000 tonnes en orbite basse terrestre.

Le scénario *Mars Direct*, qui propose d'utiliser l'atmosphère de Mars pour s'insérer en orbite martienne et pour produire les ergols du trajet retour, annonce des masses au départ de l'orbite terrestre nettement plus attractives, limitées à quelques centaines de tonnes (230 tonnes dans les cas les plus optimistes pour un équipage de quatre astronautes, ce qui serait réalisable avec deux lanceurs lourds de type SLS). Toutefois, selon notre analyse, la manœuvre d'aéro-capture telle qu'elle est proposée dans ce scénario est trop ambitieuse, d'un point de vue technique (précision du guidage, tenue des matériaux au frottement atmosphérique) et pour des raisons physiques.

Les astronautes subiraient d'importantes décélérations. Nous étudions cependant avec intérêt des scénarios en propul-

sion chimique reprenant quelques idées de *Mars Direct*.

L'utilisation de la propulsion nucléaire chimique est une autre option envisagée par les Américains pour réduire la masse d'ergols nécessaire à la mission et donc la masse initiale au départ de l'orbite terrestre. En effet, l'impulsion spécifique de la propulsion nucléaire thermique, dont le principe est de chauffer de l'hydrogène par un réacteur nucléaire avant de l'accélérer dans une tuyère, est deux fois supérieure à celle de la propulsion chimique cryotechnique. Cependant, même si des programmes de développement de moteurs nucléaires (Nuclear Power) ont été conduits dans les années 1960 et 1970 aux États-Unis et en Russie, ce type de propulsion, qui n'a jamais servi dans l'espace, est si complexe à tester au sol (car il faut traiter l'hydrogène irradié sortant du moteur). Avec ces types de propulsion, les trajets aller et retour dureraient environ six mois, avec un séjour planétaire de 500 à 600 jours.

La durée globale de la mission à un an et demi utilisant un autre type de trajectoire (de type « opposition »),



Vue d'artiste d'un véhicule à propulsion nucléaire électrique.

mais les trajets interplanétaires, pendant lesquels les astronautes seront exposés aux rayonnements cosmiques, dureront les huit à neuf mois et le séjour sur Mars ne sera plus que de un à deux mois.

Le CNES s'intéresse aussi à l'utilisation de la propulsion électrique de très faible puissance pour les missions de longue durée.

Elle se définit par deux axes : les trajectoires Terre-Mars en poussée continue et les technologies envisageables

pour la génération de puissance. Les trajectoires envisagées se décomposent en plusieurs phases : une phase de poussée continue ou bien d'arcs de poussée (moins consommateurs, mais plus lents) en orbite terrestre, puis une phase de poussée continue interplanétaire : on accélère jusqu'à mi-chemin, puis on

(on inverse en fait la direction de la poussée), et enfin une phase de freinage final en spirale pour insé-

rait pendant plusieurs jours d'affilée. La NASA développe déjà un véhicule d'exploration spatiale qui pourra être utilisé comme capsule autour des astéroïdes, et le même modèle serait ensuite adapté pour un rover de surface pour la Lune ou Mars.

Les avantages des capsules

Les astronautes commenceront alors leur mission scientifique à la recherche de minéraux inhabituels et d'échantillons qui pourraient dater des premiers jours du Système solaire. Dans la mesure du possible, l'équipage sera composé d'astronautes qui auront à la fois les connaissances scientifiques et les compétences techniques indispensables pour résoudre les difficultés auxquelles ils risquent d'être confrontés pendant le voyage.

À la fin du mois, une petite impulsion du moteur ionique suffira pour éloigner le vaisseau de l'astéroïde et le voyage vers la Terre, d'une durée de six mois, com-

mence. Quelques jours avant d'atteindre la Terre, l'équipage montera à bord d'une capsule, se séparera du vaisseau principal et mettra le cap vers le site d'atterrissage. La manœuvre pour se mettre directement en orbite autour de la Terre est très coûteuse en énergie, le vaisseau, une fois continué sur son orbite autour du Soleil. Son énergie diminuera progressivement de façon à ce qu'il revienne en orbite terrestre un an plus tard pour attendre la prochaine mission. Son moteur ionique et son module d'habitat seront réutilisés plusieurs fois.

Après plusieurs missions d'un an vers des astéroïdes, des améliorations des équipements et des boucliers de protection contre les rayonnements ouvriront la voie vers Mars. La première mission martienne pourrait en fait ne pas se poser sur la planète rouge : elle explorerait ses deux lunes, Phobos et Deimos. Une telle mission durerait deux ans et demi au total. Mais pourquoi donc se donner tout ce mal pour aller jusqu'à Mars sans s'y arrêter ?

Parce que se poser et redécoller sont des tâches extrêmement complexes. Des missions vers les lunes martiennes permettraient aux astronautes de se reposer pour les voyages interplanétaires avant de tenter l'épreuve de se poser sur Mars, de s'y promener et de redécoller.

Les ingénieurs ont déjà proposé diverses stratégies pour optimiser la flexibilité et minimiser le coût d'une mission vers Mars. Dans les plus convaincantes, les habitats et les systèmes d'exploration seraient installés à l'avance pour servir de base opérationnelle dès l'arrivée des astronautes. Cet équipement serait acheminé par transport (ionique) lent. Sur Mars, il produirait du carburant soit à partir du dioxyde de carbone atmosphérique mélangé à de l'hydrogène apporté de la Terre, pour libérer du méthane et de l'oxygène, soit en électrolysant de l'eau du sous-sol gelée, pour donner de l'hydrogène liquide et de l'oxygène. En évitant de décoller de la Terre avec le carburant nécessaire au retour (il serait produit sur Mars), on réduirait totalement la masse lancée de la Terre (scénario *Mars Direct*).

Le mouvement relatif de la Terre et de Mars donnera aux astronautes environ une année (terrestre) et demie avant que les planètes ne retrouvent leur alignement : ils auront tout le temps d'explorer la planète rouge. À la fin de leur séjour, ils monteront à bord d'une fusée remplie du carburant produit sur place, se propulseront en orbite martienne, rejoindront un véhicule interplanétaire utilisé pour la campagne vers les astéroïdes et reviendront sur Terre. Le véhicule pour la même être placé sur une trajectoire cyclique qui fera la navette entre la Terre et Mars, utilisant la gravitation pour se propulser sans énergie.

Même en déposant à l'avance du matériel, un vaisseau martien et sa fusée de retour seront extrêmement lourds et auront besoin pour décoller du plus gros des lanceurs SLS prévus. L'approche par étapes que nous recommandons permettra à la NASA de se concentrer sur la résolution des problèmes véritablement ardues, tels que la protection contre les rayonnements.

Aujourd'hui, les principaux obstacles à l'exploration ne sont pas techniques, mais financiers : il s'agit de trouver comment en faire toujours plus avec toujours moins. C'est la condition pour que l'exploration spatiale trouve son second souffle. Avec pour objectif : aller et flâner parmi les planètes.

rer le vaisseau sur une orbite martienne. Dans ce type de scénario, les astronautes ne sont envoyés qu'une fois, à destination, et arrivent sur une orbite terrestre très haute, juste avant le grand arc de poussée interplanétaire.

Combier propulsion solaire électrique pour la montée en orbite elliptique et propulsion chimique pour le trajet vers Mars est une idée qui n'est pas nouvelle (elle était déjà la solution de référence de la NASA en 1969), mais qui est pertinente pour — une fois encore — réduire la masse à placer en orbite terrestre.

Si on envisage d'effectuer tout le trajet en propulsion électrique en restant à des valeurs de puissance accessibles avec des panneaux solaires, comme cela est suggéré dans l'article, les temps de trajet seront plus longs qu'avec la propulsion chimique classique, augmentant ainsi la durée d'exposition de l'équipage

consiste à contraindre à réduire le plus possible la durée des voyages. La clé de la réduction du temps de trajet réside dans la substitution des panneaux solaires, qui ne peuvent pas fournir plus de quelques centaines de kilowatts par un réacteur nucléaire qui augmentera les propulseurs électriques avec une puissance de plusieurs mégawatts.

En poursuivant ce raisonnement à l'extrême, certains pensent que la durée du trajet pourrait être réduite à moins de 40 jours. C'est le cas de l'explorateur américain Chang-Diaz, dont la Société *Ad-Astra* étudie la possibilité d'une mission de 39 jours reposant sur quatre réacteurs de 50 mégawatts électriques pour déposer un module de 20 tonnes en orbite martienne ! Les études que nous menons depuis plusieurs années sur ce sujet, notamment avec l'ONERA, montrent qu'une mission si courte

gent. Ainsi, avec un seul réacteur de 20 mégawatts, il serait possible de véhiculer des astronautes vers Mars en quatre mois tout en ayant une masse au départ accessible en trois à cinq tirs de lanceurs lourds. Nous étudions aussi des scénarios intermédiaires pour lesquels la durée de mission serait la même qu'en propulsion chimique, mais où la propulsion électrique à forte puissance permettrait de réduire le nombre de lanceurs nécessaires, de bénéficier d'options de retour plus intéressantes et surtout d'avoir des fenêtres de départ nettement plus flexibles que celles accessibles en propulsion chimique. Ils dureraient en général un mois au maximum, et existent que tous les deux ans environ.

Pour le moment, le scénario de référence n'est pas encore établi. La NASA étudie des solutions possibles prometteuses et encourage les équipes de réflexion aux ingénieurs !

Élisa Cliquet

CNES – Direction des lanceurs

Biologie animale

Le RETOUR de la punaise



des lits

Kenneth Haynes

Depuis quelques années, les punaises des lits, des parasites suceurs de sang, sont de retour dans des pays où on les avait oubliées. Les scientifiques recherchent leur talon d'Achille.

L'ESSENTIEL

✓ Après un répit de plusieurs décennies, les punaises des lits sont en recrudescence dans les pays occidentaux.

✓ Une conjonction de facteurs qui vont de la résistance aux insecticides aux déplacements internationaux, semble avoir conduit au retour du parasite.

✓ Des scientifiques ont récemment identifié, chez la punaise des lits, des traits biologiques et comportementaux pouvant conduire à de nouveaux moyens de lutte contre ces insectes.

Avec l'aimable autorisation de Graham Snodgrass, Service de santé des Forces armées américaines

Le vieil homme était seul dans un HLM près de Cincinnati (Ohio, États-Unis). Enfin, pas tout à fait seul. La nuit tombée, les punaises commençaient à sortir de son matelas en piteux état pour se repaître du sang de leur hôte. À en juger par les milliers de bestioles que j'ai découvertes chez lui, cela durait sans doute depuis des mois. Handicapé et pauvre, le vieil homme était devenu la proie des punaises qui s'étaient mises à pulluler, tandis que lui endurait, nuit après nuit, leurs piqûres.

Après avoir quasiment disparu pendant presque 50 ans, grâce à l'utilisation du DDT et autres pesticides à large spectre, la punaise des lits, *Cimex lectularius*, fait un retour inquiétant aux États-Unis, en Australie et en Europe ; et pas seulement dans les endroits insalubres et surpeuplés. Le parasite peut infester les hôtels de luxe, les résidences universitaires, les centres commerciaux, les immeubles de bureaux, les salles de spectacle, les hôpitaux et les domiciles des riches comme ceux des pauvres.

Le fléau a un coût économique. C'est le cas, par exemple, lorsqu'un hôtel doit temporairement fermer des chambres infestées. Dans l'Ohio, près de 400 000 euros ont dû être dépensés pour en finir avec les punaises qui avaient envahi des logements sociaux. Après avoir tenté de les éradiquer par des moyens plus classiques, la fumigation de l'ensemble du bâtiment s'est révélée la seule solution efficace.

Heureusement, les punaises des lits ne semblent pas entraîner d'autres nuisances directes que leurs piqûres et les démangeaisons. Elles ne véhiculent pas de maladies. Certes, une étude publiée en 2011 a révélé la présence chez ces insectes de bactéries SARM (*Staphylococcus aureus* [staphylocoque doré] résistant à la *méticilline*), qui provoquent des lésions graves de la peau ; mais des recherches plus approfondies devront déterminer si les punaises contribuent à la propagation du staphylocoque doré.

Pour venir à bout des punaises des lits, les scientifiques ont cherché à comprendre comment elles avaient réussi à revenir en force. Apparemment, elles ont bénéficié d'une combinaison idéale de facteurs : l'apparition de gènes de résistance aux insecticides, des changements de stratégie visant à éradiquer d'autres insectes nuisibles en milieu urbain, la multiplication des voyages internationaux et des



1. UNE PUNAISE DES LITS EN TRAIN DE PIQUER ET S'ALIMENTER. *Cimex lectularius* est un insecte dépourvu d'ailes et dont la taille maximale est de sept millimètres. Sa durée de vie est comprise entre quatre mois et une année environ. Les deux sexes se nourrissent de sang humain.

Toute une famille

✓ La punaise des lits désigne à proprement parler l'espèce *Cimex lectularius*, qui fait partie de la famille des Cimicidae. Cette famille réunit une centaine d'espèces de punaises parasites qui se nourrissent aux dépens d'animaux à sang chaud, principalement les oiseaux, les chauves-souris et, pour deux d'entre elles, l'homme. Ces dernières sont la punaise des lits *Cimex lectularius*, espèce cosmopolite, et *Cimex hemipterus*, qui sévit dans les régions tropicales. Les autres espèces, telles que *C. columbarius*, *C. dissimilis* ou *Oeciacanthus*, ne piquent qu'accidentellement l'homme.

migrations. Heureusement, des études récentes proposent de nouvelles approches pour détecter les premiers signes de colonisation d'un lieu par ces insectes hématophages avant qu'ils ne se mettent à proliférer. Certains aspects de leur biologie, mis au jour lors de ces travaux, pourraient constituer des cibles appropriées dans la lutte contre les punaises des lits.

Comprendre comment s'est produite cette nouvelle invasion nécessite de bien connaître la biologie des insectes en question. Les punaises des lits sont attirées par la chaleur et le dioxyde de carbone (et peut-être aussi les odeurs corporelles) que dégagent tous les êtres humains. Elles vivent en groupe, dans les lits ou à proximité; elles se cachent le jour dans les recoins et les fissures et, la nuit venue, sortent pour se nourrir du sang des dormeurs. Une femelle adulte pond environ deux œufs par jour lorsqu'elle a des repas de sang réguliers; on estime ainsi qu'elle pond en moyenne 150 à 200 œufs au cours de sa vie. Dans des conditions optimales, les punaises des lits peuvent vivre six mois ou plus sans se nourrir. Elles se disséminent aisément en marchant d'une pièce à l'autre, et en s'accrochant aux vêtements, chaussures ou autres accessoires.

La lutte acharnée que livre l'humanité contre la punaise des lits ne date pas d'hier. Les archéologues ont retrouvé des restes de ces parasites datant de 3500 ans, à l'époque des pharaons de l'Égypte ancienne. Cette cohabitation remonterait

même encore plus loin. Certains experts avancent que l'ancêtre de la punaise des lits serait un parasite de la chauve-souris qui aurait migré sur l'homme quand ce dernier a commencé à séjourner dans les cavernes. Ce compagnonnage se serait scellé quand nos ancêtres ont abandonné leur mode de vie nomade pour devenir sédentaires. Dans les régions tempérées, le début de l'hiver permettait au moins de contenir les hordes d'insectes. Les punaises étant sensibles au froid, leur population croissait pendant les mois les plus chauds et diminuait aux premiers frimas.

Des insectes tenaces

Avant l'arrivée des pesticides, nos prédecesseurs avaient tout essayé pour réduire les effectifs des punaises, prenant parfois certains risques que nos sociétés modernes ne s'autoriseraient pas. En 1777, un manuel pour le contrôle de la vermine suggérait de placer de la poudre à canon dans les fissures autour du lit et d'y mettre le feu (j'ignore si c'était là une solution pratique ou une forme de vengeance). Sinon, certaines plantes – l'armoise ou l'ellébore – bouillies avec « la quantité appropriée d'urine » étaient censées venir à bout des punaises (ou peut-être cela obligeait tout simplement les gens à aller dormir ailleurs...). On utilisait aussi l'arsenic, le cyanure et autres composés fort dangereux, sans grand succès. Plus communément, les gens s'attaquaient au problème en nettoyant la pièce concernée de fond en comble, en lessivant les parties fixes du lit à l'eau bouillante et au kérosène et en se débarrassant de la toile recouvrant la paillasse. Un bref répit s'ensuivait.

Avec la généralisation du chauffage central en Europe et aux États-Unis, à partir du début du XX^e siècle, la punaise des lits s'est mise à prospérer tout au long de l'année. Seule la mise au point du DDT a permis une réelle accalmie, à partir des années 1940. Utilisé pour la première fois pendant la Seconde Guerre mondiale, afin de protéger les forces armées américaines contre les moustiques et les poux, le DDT s'est aussi révélé un bon moyen pour éliminer la punaise des lits. Contrairement à d'autres traitements présents sur le marché, une seule application suffisait en général, l'effet du DDT étant durable. En quelques années, la punaise des lits a complètement disparu des pays d'Amérique du

Nord et d'Europe occidentale, ainsi que d'autres nations développées. Malheureusement, entre autres conséquences graves sur l'environnement, le DDT et des composés similaires ont aussi contribué à la quasi-extinction de certains oiseaux de proie. Ces produits très nocifs ont été retirés de la vente dans les années 1970.

Pour autant, la punaise des lits n'a pas resurgi tout de suite. Sa réapparition date de l'an 2000. Les chercheurs en ont proposé diverses explications. L'intensification des voyages internationaux à partir de régions du monde où les punaises des lits n'avaient jamais été sous contrôle aurait permis à ces insectes de réinvestir des zones qui en avaient été débarrassées, bien que la soudaineté de cette résurgence ne coïncide avec aucune modification notable de la fréquence des voyages. Un facteur plus déterminant a peut-être été l'effondrement des barrières politiques qui restreignaient les voyages entre l'Est et l'Ouest, ainsi qu'une plus grande mobilité des populations à l'intérieur des pays.

L'abandon des pesticides à spectre large autres que le DDT, pour l'utilisation d'appâts plus ciblés et plus efficaces, et d'aérosols visant à éliminer des espèces particulières de nuisibles tels que les cafards, les fourmis et d'autres insectes urbains, aurait aussi permis aux punaises des lits de passer à travers les mailles du filet. De même, la mixité sociale qui fait se côtoyer des gens pauvres et de plus nantis dans nos sociétés d'habitat dense peut jouer un rôle dans cette propagation.

Quand un canapé à l'aspect flamboyant se finit sur le trottoir parce qu'il est infesté de punaises, il est probable qu'il se retrouve chez une personne dans le besoin.

La résistance aux insecticides n'est pas non plus étrangère au problème. La punaise des lits est l'un des premiers insectes ayant développé une résistance au DDT. Les premiers cas ont été constatés à Pearl Harbor, juste après la Seconde Guerre mondiale. Alors que certains experts préconisent le retour au DDT dans les chambres à coucher, il est ainsi probable que les punaises d'aujourd'hui résisteraient à ses effets. Et des résistances aux insecticides ayant remplacé le DDT se sont développées partout dans le monde. Enfin, la stigmatisation sociale associée aux punaises des lits, qui retarde l'administration de traitements efficaces, est un élément supplémentaire qui a pu jouer en faveur de leur expansion actuelle.

Les détecter au plus tôt

Au vu de son histoire millénaire, la punaise des lits est un ennemi intimidant. Mais les chercheurs marquent des points. L'une des priorités est d'identifier de meilleurs moyens de les détecter tôt. Parce qu'elles sont petites et qu'elles se cachent durant le jour, les punaises sont difficiles à trouver et à atteindre. Pourtant, détecter avec fiabilité leur présence est un élément

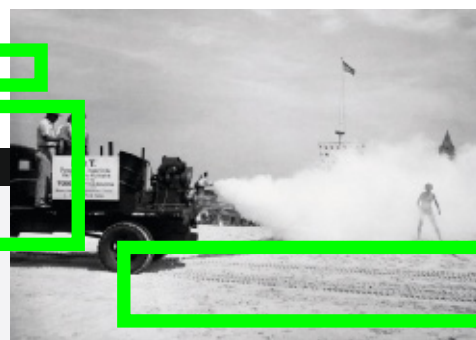
clé, comme l'est le fait de contrôler leur expansion avant un traitement. L'un des outils de détection les plus simples appar-

u récemment sur le marché, est l'intercepteur d'insectes *ClimbUp*. Il s'agit d'un bol peu profond entouré d'une large rigole (ce sont en fait deux bols en plastique emboîtés l'un dans l'autre et moulés en une seule pièce) et conçu pour être placé sous un pied de lit (voir la figure 2). Ce piège renseigne sur l'endroit d'où proviennent les punaises. Si elles apparaissent dans le puits intérieur, elles descendent du lit. Si elles finissent dans le puits externe, les punaises viennent sans aucun doute d'une autre partie de la pièce. Mais un tel dispositif peut échoir à détecter une petite colonie de punaises, ou une colonie ayant élu domicile dans la tête de lit.

Un autre type de dispositif de détection exploite les mécanismes qui permettent à la punaise de localiser sa proie. Des pièges dégagent de la chaleur ou du dioxyde de carbone, ainsi que d'autres substances attractives dont le nom n'est pas divulgué, sont maintenant sur le marché. On peut aussi concevoir soi-même un leurre assez efficace à partir d'une gamelle pour chat que l'on pose à l'envers et dans laquelle on place un morceau de neige carbonique qui se sublimine lentement en dioxyde de carbone. Hélas, comme dans le cas du double bol *ClimbUp*, le dispositif ne permet pas toujours de détecter les punaises au début de l'invasion, c'est-à-dire au moment où elles sont le plus facile à éliminer.

UNE ÉRÈVE HISTOIRE DE LA PUNAISE DES LITS

Depuis des milliers d'années, la punaise des lits est une nuisance pour l'être humain. Ce dernier a parfois fait usage de méthodes dangereuses (et inefficaces) pour tenter de l'éradiquer. Après une quasi-absence de plusieurs décennies, obtenue grâce à l'utilisation du DDT et d'autres pesticides similaires, la punaise des lits refait son apparition.



ANNÉES 1940

Grâce au DDT, on parvient pour la première fois à se débarrasser des punaises des lits.



IL Y A 3 500 ANS
Les plus vieilles
traces archéologiques
de punaises des lits.

III^e SIÈCLE
La poudre de canon
est préconisée
pour lutter contre
la punaise des lits.

DÉBUT DU XX^e SIÈCLE
Le chauffage central
de plus en plus répandu,
permet à la punaise
des lits de prospérer
toute l'année.

ANNÉES 1970
Le DDT est retiré
du marché pour raisons
environnementales.

2000
Retour en force
de la punaise
des lits.

David G. / Getty Images
Alex / iStockphoto (pour le DDT)
Alex / iStockphoto (pour la punaise)

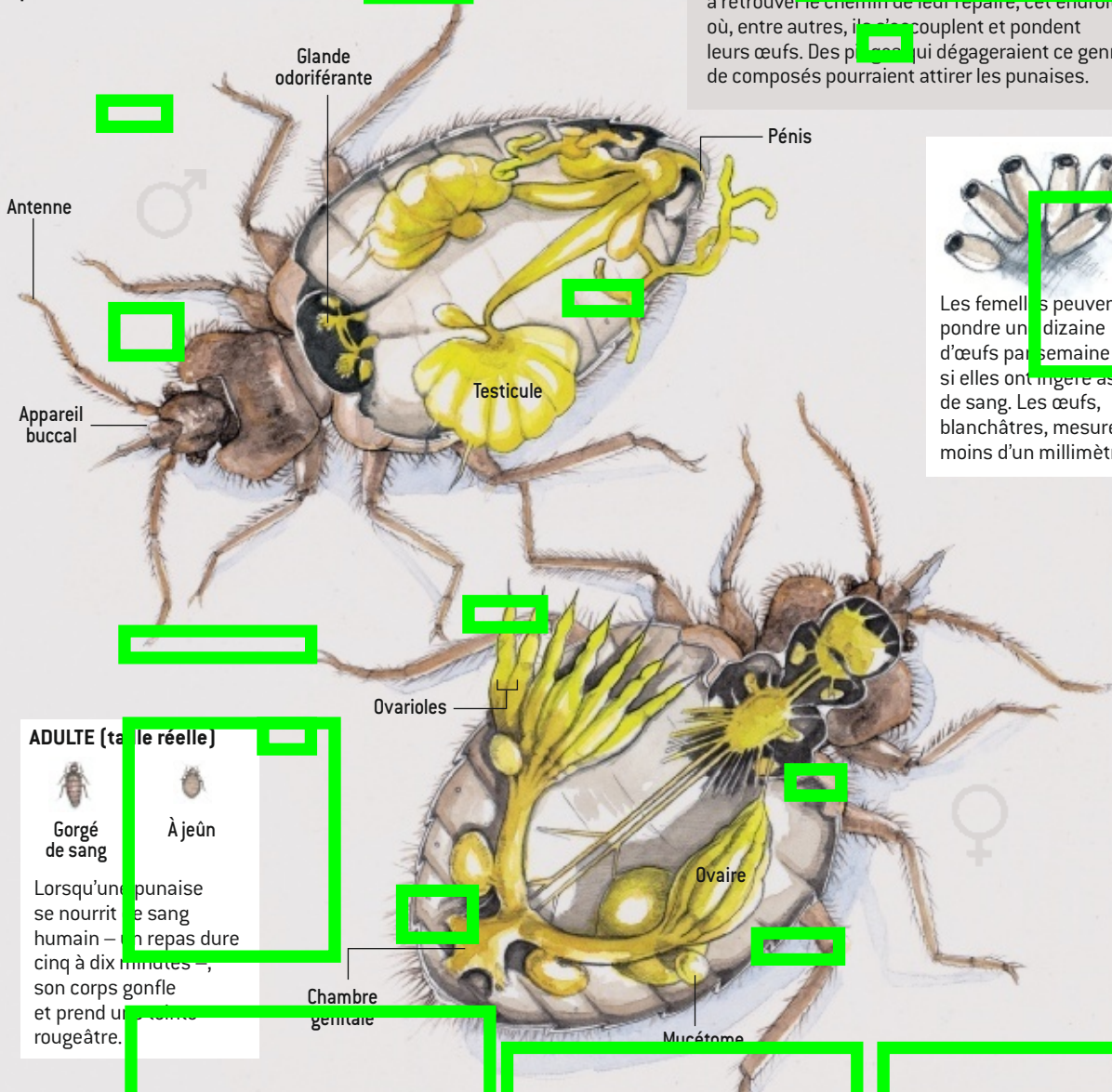
CONNAÎTRE SON ENNEMI

La punaise des lits est un ennemi redoutable. Son petit corps aplati lui permet de se faufiler dans le moindre interstice. Elle attend dans sa cachette jusqu'à la tombée de la nuit, puis, protégée par l'obscurité, va se repaître du sang de sa victime. Les femelles sont très fécondes : elles peuvent pondre entre 150 et 500 œufs au cours de leur vie. Résistants, ces insectes posent de nombreux défis à l'heure de se nourrir. Des études récentes suggèrent néanmoins de nouvelles approches pour détecter et éliminer ce fléau.

DÉTECTION

Les capteurs thermiques dont sont munies les antennes et les capteurs de dioxyde de carbone qui équipent l'appareil buccal permettent à la punaise de détecter ses hôtes. Des pièges dégageant de la chaleur ou du dioxyde de carbone pourraient attirer les punaises.

- Les composés qui émanent du corps de la punaise aident les membres du groupe à retrouver le chemin de leur repaire, cet endroit où, entre autres, ils s'accouplent et pondent leurs œufs. Des pièges qui dégageaient ce genre de composés pourraient attirer les punaises.



ADULTE (taille réelle)



Gorgé de sang



À jeun

Lorsqu'une punaise se nourrit de sang humain – un repas dure cinq à dix minutes –, son corps gonfle et prend une teinte rougeâtre.

ÉLIMINATION

- Le pénis en forme de sabre de la punaise mâle peut être fatal pour la femelle. Les juvéniles et les mâles adultes produisent des phéromones qui dissuadent les autres mâles de s'accoupler avec eux. Des composés synthétiques fondés

sur ces phéromones pourraient accroître ces accouplements préjudiciables, ou interrompre les accouplements.

- Un organe nommé mucétome abrite des bactéries symbiotiques qui fournissent des substances nutritives à la punaise et accroissent

sa fécondité. Un antibiotique actif contre ces bactéries aiderait à éliminer les punaises des lits.

- Des enzymes permettent aux punaises de résister aux insecticides. Des composés ciblant ces enzymes peuvent rétablir la sensibilité aux pesticides.

Illustrations de Mille Sudai

Actuellement, pour repérer de petites populations encore dispersées de punaises des lits, le chien, bien entraîné, reste imbattable. Ce que capte au juste l'odorat de cet animal reste mal connu; il est possible qu'il s'agisse de l'ensemble des composés odorants que des chercheurs de l'Université Simon Fraser (Colombie-Britannique, Canada) ont identifié en 2008 comme étant les signaux chimiques émis par les punaises des lits pour se rassembler. Les repas de sang mis à part, tout ce qui fait la vie des punaises – l'accouplement, la ponte, le développement des larves, etc. – se déroule dans des sortes de cachettes que les insectes marquent avec leurs excréments et avec des composés volatils émanant de leur corps. Ces signaux permettent aux membres de la colonie de retrouver le chemin de leur quartier général. Cette tendance grégaire des punaises des lits est probablement dans l'intérêt de chacune d'elles, ne serait-ce qu'en accroissant le degré d'humidité de leur microhabitat. Si on pouvait simuler ces signaux d'agrégation, on pourrait mettre au point un piège simple permettant de déterminer la présence ou l'absence de punaises. Avec un tel dispositif, s'il restait discret, les hôteliers seraient en mesure de contrôler les chambres à l'insu de leurs clients.

Une élimination difficile

Bien sûr, détecter la présence de punaises n'est qu'une première étape. Les éradiquer est une toute autre histoire. Après avoir soigneusement mené l'inspection, les intervenants utilisent en général l'enveloppe des matelas et des sommiers pour ensevelir définitivement celles qui s'y étaient nichées. Ils peuvent passer l'aspirateur, traiter à la vapeur, par la congélation, ou pulvériser un insecticide à action rapide pour éliminer les punaises visibles. Ils répandent parfois des poudres insecticides ou des échantes dans les fentes et lézards afin de tuer les punaises qui s'y sont réfugiées, et des insecticides à effet résiduel qui, pendant des jours, des semaines ou des mois, continueront de tuer les insectes parcourant les surfaces traitées.

Or même les insecticides les plus efficaces, placés entre les mains les plus expertes, devront en général être appliqués plusieurs fois sur une durée de plusieurs semaines pour éliminer l'infestation. Ces insecticides, mis essentiellement à la disposition des professionnels, mènent à une

licence doivent être utilisés selon une procédure stricte afin de protéger la santé humaine et l'environnement. Les produits en vente libre peuvent être dangereux s'ils sont mal employés. De plus, ils sont souvent inefficaces.

Chasser une pièce ou une maison à l'aide d'un équipement professionnel pour atteindre 50 °C durant quatre heures constitue en revanche une solution non toxique grâce à laquelle on obtient souvent de bons résultats. Mais mis à part le traitement par la chaleur ou la fumigation de l'ensemble d'un bâtiment, se débarrasser des punaises des lits requiert la combinaison judicieuse de plusieurs stratégies.

De nouvelles méthodes sont nécessaires pour éliminer les punaises une fois qu'elles ont été localisées. C'est pourquoi des chercheurs du monde entier se penchent

sur leur comportement inhabituel en matière d'accouplement. La copulation chez les punaises des lits est un acte brutal. Le mâle agit en forme de sabre qu'il utilise pour transpercer le tégument, ou cuticule, abdominal de la femelle. Cette forme d'accouplement est connue sous le nom d'insémination traumatique.

L'évolution a pourvu les punaises femelles d'adaptations à ce type de copulation d'urgence. Un sillon en V, sorte de tubercule nommé ectospermalege et qui se développe à un endroit précis de l'abdomen, guide l'appendice vulnérant du mâle et limite les dégâts. Une fois introduits dans la cavité abdominale de la punaise, les spermatozoïdes et les agents pathogènes qui les accompagnent parfois migrent à travers une barrière de cellules sanguines peu structurée, mais ayant une fonction immunitaire supposée – le mésospermalege. Les spermatozoïdes parviennent ensuite jusqu'à une zone de stockage située à la base de chaque ovaire.

Malgré les adaptations morphologiques du corps de la femelle, celle-ci est sujette à une forte mortalité, en raison des lésions causées par la multiplication des copulations. C'est ce qui s'est produit dans notre laboratoire où l'on a très vite remarqué la

L'AUTEUR

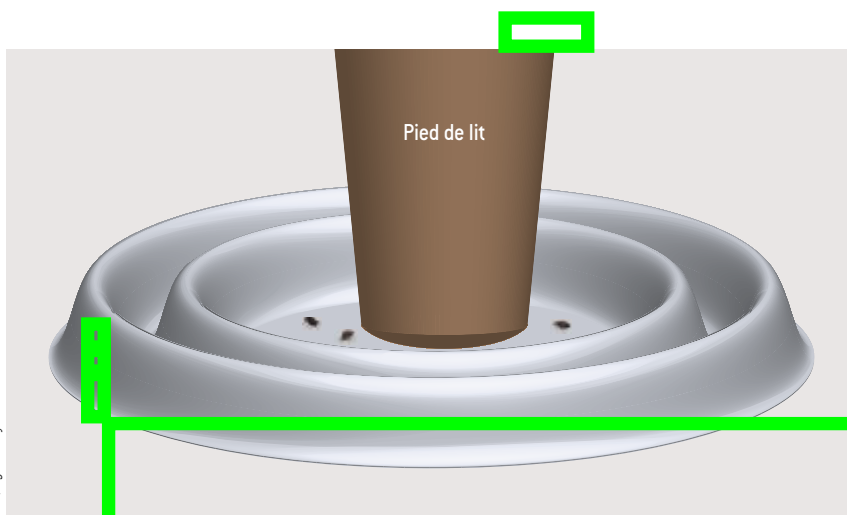


Kenneth HAYNES est professeur d'entomologie à l'Université du Kentucky, aux États-Unis.

DE NOUVELLES MÉTHODES SONT NÉCESSAIRES
pour éliminer les punaises. C'est pourquoi
des chercheurs du monde entier se penchent
sur le comportement inhabituel
de ces insectes en matière d'accouplement.

✓ BIBLIOGRAPHIE

- M. F. Potter, *The history of bed bug management – With lessons from the past*, *American Entomologist*, vol. 57(1), pp. 14-25, 2011.
- V. Harracine *et al.*, Nymphs of the common bed bug (*Cimex lectularius*) produce anti-aphrodisiac defence against conspecific males, *BMC Biology*, vol. 8, n° 12, 2010.
- P. Delaunay *et al.*, Les punaises de lits (*Cimex lectularius* et *Cimex hemipterus*) – Biologie, lutte et santé publique. *Diag. Scientifique*. Association des Naturalistes de Nice et des Alpes-Maritimes, 2010.
- J. M. Berenger *et al.*, Les punaises de lits (*Hemiptera: Cimicidae*). Une actualité « envahissante », *Médecine Tropicale*, vol. 68, pp. 563-566, 2008.
- J. Carayon, *Insémination extra-génitale traumatique*, dans P.-P. Grassé (éd.), *Traité de zoologie*, tome VIII, fasc. V-A, pp. 352-391, Masson, 1977.



2. CE PIÈGE SIMPLE PERMET DE DÉTERMINER si les punaises des lits ont élu domicile dans le lit ou si elles proviennent d'un autre endroit. Les parois des deux cavités circulaires sont lisses ou lubrifiées, ce qui permet de piéger les insectes en entrant à la recherche des punaises dans le creux même, qui accueille le pied du lit, c'est que ces insectes logent dans le lit. Sinon, ils viennent d'ailleurs.

prédominance des mâles. Sans intervention humaine, les colonies de punaises en captivité s'éteindraient. Ce n'est pas le cas dans le monde réel où il est probable que les femelles se dispersent pour échapper à ces copulations multilantes. Pourquoi la punaise des lits a-t-elle emprunté cette trajectoire de l'évolution qui lui coûte si cher, alors que les femelles de millions d'autres espèces ont développé des orifices sexuels qui permettent une insémination sans blessure ? Mes collègues et moi cherchons à savoir si ce type d'accouplement ne serait pas un point de vulnérabilité exploitable.

Des études publiées en 2009 et 2010 par Rickard Igell, de l'Université suédoise des sciences agronomiques d'Alnarp, et ses collègues, et par Camilla Ryne, de l'Université de Lund (Suède), ont mis en évidence une autre adaptation chez ces punaises, liée à l'insémination traumatique et qui pourrait se révéler utile. Les mâles ne sont pas très sélectifs en matière de partenaires sexuels. Ils se précipitent sur les autres punaises mâles et même sur des mâles ou des femelles encore immatures. Ce type de copulation peut provoquer des lésions cuticulaires fatales sur des individus dont la morphologie n'est pas adaptée au transperçement abdominal, comme l'est celle d'une femelle adulte.

Les chercheurs ont découvert que pour détourner ces avances risquées, les larves et les mâles adultes libèrent des phéromones qui indiquent à l'assaillant qu'il perd son temps et son sperme. Il n'en faut pas plus pour que la punaise cesse de manipuler ces réactions innées à notre

avantage. En théorie, recourir aux phéromones synthétiques dans les endroits où se réfugient les punaises permettrait de décourager toute forme d'accouplement. Et dans l'éventualité où les punaises s'habituent à l'odeur, cela pourrait conduire à de fâcheuses erreurs d'accouplement et, finalement, à l'extinction du groupe, comme cela se produit pour les punaises captives en laboratoire.

Antibiotiques à l'aide ?

Un autre aspect de la reproduction de la punaise des lits mérite d'être mentionné. Comme c'est le cas pour la plupart des animaux qui se reproduisent sexuellement, les punaises mâles ont une paire de testicules qui fabriquent des spermatozoïdes et un canal déférent qui transmet les spermatozoïdes et des sécrétions accessoires à la femelle au cours de la copulation. La femelle dépose, elle, d'une paire d'ovaires produisant des œufs qui sont ensuite acheminés à l'extérieur par un oviducte. Elle a aussi un organe appelé mycétome qui contient des bactéries symbiotiques.

Takena Fukatsu, de l'Institut japonais de sciences et technologies industrielles avancées, et ses collègues ont privé des punaises des lits de ces bactéries en leur administrant des antibiotiques. Ils ont découvert que les femelles avaient alors des taux de reproduction plus faibles. En ajoutant de la vitamine B au sang ingurgité par la femelle, ils ont rétabli sa fécondité, ce qui signifie que les bactéries du mycétome aident à fournir ces nutriments.

Sur la base de cette découverte, il est tentant d'imaginer que les scientifiques pourraient administrer des antibiotiques aux personnes subissant les assauts des punaises et ainsi indirectement atteindre ces bactéries, ce qui, en définitive, reviendrait à tuer les punaises. Nous avons pourtant besoin d'une solution plus spécifique. Utiliser des antibiotiques à large spectre pour traiter une personne qui n'est pas malade pourrait provoquer une cascade de problèmes. Tout d'abord, les bonnes bactéries contenues dans nos intestins seraient perturbées. Ensuite, les bactéries résistantes aux antibiotiques pourraient finir par prendre le dessus, et il se peut que certaines d'entre elles soient pathogènes pour l'être humain ou entraînent une déficience en vitamines. Les bactéries du mycétome constituent une voie sérieuse à explorer, mais il faudrait concevoir des antibiotiques très ciblés, qui n'agissent que sur cette bactérie.

Quant au développement de nouveaux insecticides, l'avenir est incertain. Ces dernières décennies, pour lutter contre les punaises des lits, on s'est beaucoup appuyé sur des produits à base de composés nommés pyréthrinoides. Or les punaises sont en train de devenir résistantes à ces substances, ce qui n'est pas surprenant étant donné que les premières résistances au DDT ont été rapportées dès la fin des années 1940.

Le DDT et les pyréthrinoides ont un mode d'action commun qui se traduit souvent par une résistance croisée, c'est-à-dire que le développement d'une résistance à un composé entraîne une résistance à l'autre. Mes collègues et moi avons découvert à Cincinnati des punaises des lits plus de 10 000 fois plus résistantes à un composé chimique d'usage courant appartenant à la famille des pyréthrinoides, la deltaméthrine. Autrement dit, pour tuer ce type de punaises, il faut 10 000 fois la dose habituelle. Nous étions interloqués devant le spectacle de ces punaises pataugeant dans une colle de deltaméthrine pure et qui s'en sortaient vivantes et prêtes à repartir piquer leurs victimes dès le lendemain soir, alors que leurs congénères, sensibles au produit, périssaient une fois exposées à la moindre trace de celui-ci. Elles avaient aussi développé une résistance croisée au DDT.

Ces données à cuire de Cincinnati ne sont pas des cas isolés. Mon équipe a décelé des gènes de résistance aux insecticides chez plus de 85 pour cent des

punaises des lits que nous avons échantillonnées sur le territoire des États-Unis. Notre équipe et d'autres ne font que commencer à identifier les mécanismes de cette résistance. Deux de mes collègues de l'Université du Kentucky, Fang Zhu et Subba Reddy Palli, ont utilisé des techniques de génie génétique pour rétablir la sensibilité aux insecticides de punaises résistantes. Selon leurs travaux, des enzymes présentes dans les couches résistances, et qui agissent pour détoxifier les insecticides, pourraient être l'objet d'interventions ciblées.

De même, mon équipe a découvert qu'un composé connu pour accroître la toxicité des insecticides en prenant pour cible ce complexe d'enzymes rendait plus sensible à la deltaméthrine notre population de punaises hyperrésistantes. L'industrie de lutte contre les nuisibles utilise déjà des formes commerciales du composé qu'est le butoxyde de piréthronyle pour rétablir un certain niveau de sensibilité aux pyréthroïdes chez les punaises. Les chercheurs pourraient être bientôt en mesure

d'identifier le mode de résistance de tout type de punaises pour ensuite adopter une stratégie d'éradication adéquate, en sélectionnant des insecticides et autres substances qui fonctionneraient sur ce groupe particulier de nuisibles.

Faire appel au bon sens

La punaise des lits est un véritable cauchemar en particulier pour ceux qui n'ont pas les moyens financiers de recourir à des contre-mesures efficaces. Les professionnels de la lutte contre les parasites peuvent venir à bout d'une infestation en effectuant des inspections approfondies et méthodiques des lieux, en utilisant avec compétence les insecticides à leur disposition et en employant toute une panoplie d'autres stratégies. Cela nécessite une main-d'œuvre importante et a un coût.

En fin de compte, le mieux est encore de faire appel à son bon sens pour éviter d'introduire des punaises des lits chez soi. En ce qui me concerne, lorsque je reviens d'un appartement infesté, je mets mes vête-

ments dans le séchoir électrique et le règle sur la chaleur maximale. Au retour de voyage plutôt que de prendre le risque d'une invasion à la maison, je préfère laisser ma valise tout un week-end dans ma voiture garée sous un soleil de plomb : l'exposition prolongée d'un bagage à une température de 50 °C permet d'occire définitivement les éventuelles punaises qui s'y seraient glissées. En venir à bout par le gel à l'intérieur d'un véhicule est difficilement envisageable, car les punaises peuvent survivre de nombreuses heures aux températures atteintes par un congélateur domestique.

Il est peu probable que les punaises des lits retrouvent leur récent statut de nuisibles oubliés. Mais en faisant de la prévention auprès du public, tout en explorant les points de vulnérabilité particuliers de l'infestation en question, les scientifiques peuvent marquer des points. Considérer la punaise des lits comme un problème de santé publique et non comme un stigmate social est une étape que la société peut aujourd'hui franchir. ■

LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur www.jardindesplantes.net dans "l'agenda du jardin"

UNE EXPO / DES DÉBATS

Lundi 2 avril - 18h
Contes, légendes et histoires : les araignées, entre art et mythes
A. Gaborit, responsable de la collection Afrique au musée du quai Branly et du Pavillon des Sessions au musée du Louvre (sous réserve), *D. Noly*, conteuse et musicienne.

CONFÉRENCES

Cycle : "Rio + 20"
Lundi 16 avril - 18h
L'évaluation économique des services liés à la biodiversité : enjeux, méthodes, résultats
B. Chevassus-au-Louis, inspecteur général de l'agriculture, ancien directeur de l'INRA, ancien président du Muséum.

Lundi 23 avril - 18h
Le "coût de l'inaction politique" : l'évaluation économique peut-elle influencer nos décisions ?
Y. Laurans, chercheur associé, Institut du Développement durable et des Relations internationales (IDDRI), Fondation SciencesPo.

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5^e - Métro : Jussieu

COURS PUBLICS

Cycle : "Le processus de l'évolution biologique"
M. Veuille, directeur d'étude à l'EPHE, UMR Origine, structure et évolution de la biodiversité, Muséum/CNRS

Jeudi 5 avril - 18h : La sélection naturelle, de Darwin à la génomique évolutive
Jeudi 12 avril - 18h : Écologie moléculaire : comment s'écrit la biographie des espèces

Grand Amphithéâtre du Muséum
57 rue Cuvier, Paris 5^e - Métro : Jussieu

L'épopée de L'HOLOGRAPHIE

Sean F. Johnston

Autrefois emblématique du futurisme, l'holographie n'exerce plus la même fascination aujourd'hui. Pourtant, elle a envahi notre vie quotidienne et suscite des recherches actives.

Il y a une trentaine d'années, les expositions d'hologrammes attiraient des centaines de milliers de visiteurs dans les grandes villes du monde entier. Le public découvrait avec émerveillement des images tridimensionnelles au réalisme étonnant. On célébrait l'holographie – et on la célébrait toujours – au travers de la science-fiction. Les entrepreneurs lui prédisaient des applications dans les domaines de l'art, de la photographie et de la télévision.

Aujourd'hui, l'holographie s'est muée en une technique fertile, occupant une place importante dans la science moderne et dans notre quotidien : elle est par exemple utilisée dans les icônes de cartes de crédit. Mais en se généralisant, elle a perdu une partie de son pouvoir de séduction. Autrefois emblème du futurisme, elle peut sembler dépassée à l'heure de la télévision en trois dimensions – bien que celle-ci n'offre pas une aussi bonne possibilité de voir l'image sous différents points de vue. En outre, d'autres techniques de création d'images en relief lui sont rattachées à tort, ce qui entretient une certaine confusion sur sa nature et ses possibilités exactes. Nous verrons que toutes ces techniques sont fondées sur des principes distincts.

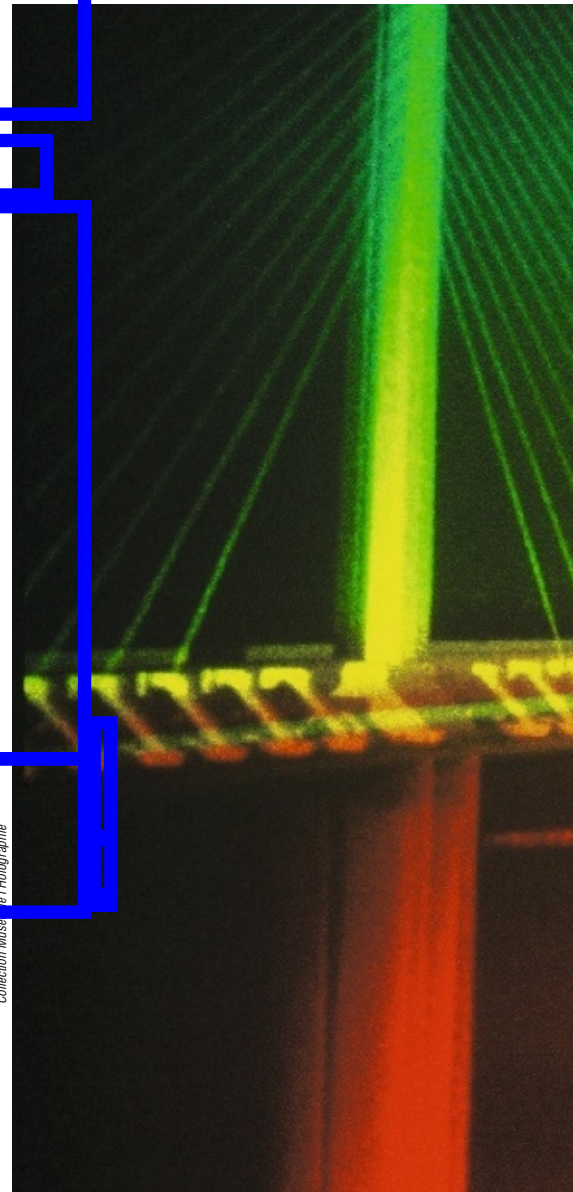
L'histoire de l'holographie, au croisement de disciplines aussi différentes que l'art et l'électronique, illustre l'une des plus grandes réussites scientifiques et techni-

ques des deux dernières générations. Elle met aussi en évidence les déceptions liées à une vision trop optimiste du progrès. Enfin, elle enseigne sur les facteurs culturels qui influencent les progrès scientifiques et le changement technologique. Entrons donc

L'optique revisitée

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'optique est devenue un domaine de l'ingénierie sophistiqué, mais routinier. L'optique géométrique, utilisée pour la conception de nombreux dispositifs, est au cœur d'industries importantes, qui ont profité des demandes liées à la guerre (jumelles, viseurs de fusils, périscopes...). Cependant, assez peu de physiciens sont attirés par ce domaine, car il met trop l'accent sur la science appliquée. Son homologue plus « noble », l'optique physique (qui s'intéresse aux phénomènes ondulatoires, tels que les interférences et la diffraction), est devenu un sujet de recherche majeur à la fin du XIX^e siècle, mais il s'est essouffé par la suite et n'a débouché que sur quelques applications pratiques.

Au moins deux de ces dernières partagent certaines caractéristiques techniques avec l'holographie – bien que ses découvreurs ne s'en soient pas directement inspirés. La première exploite un concept



Collection Musée de l'Holographie

ingénieur de photographie en couleur inventé par le physicien français d'origine luxembourgeoise Gabriel Lippmann dans les années 1890, et qui lui a valu le prix Nobel en 1908. Sa technique utilise une émulsion photographique déposée sur une surface réfléchissante pour enregistrer les différentes composantes fréquentielles – et donc les différentes couleurs – de la lumière. Celles-ci forment des ondes dites stationnaires au sein de l'émulsion : les ondes lumineuses incidentes et réfléchies se combinent pour faire vibrer sur place le champ électromagnétique, ce qui produit des maximums d'intensité à des profondeurs fixes. Des motifs se dessinent alors dans l'émulsion à des profondeurs qui dépendent de la longueur d'onde, c'est-à-dire de la couleur (voir la figure 2). Lorsque la plaque photographique est développée et éclairée par de la lumière blanche, ces motifs sombres réfléchissent et renforcent sélectivement la composante fréquentielle à laquelle ils sont associés ; au final, la couleur de l'image est restituée.

La seconde application partageant certaines caractéristiques avec l'holographie est la microscopie à contraste de phase, qui permet d'observer des échantillons transparents, et qui a valu à son créateur, le physicien néerlandais Frederik Zernike, le prix Nobel en 1953. Elle est fondée sur le ralentissement des ondes lumineuses qui traversent l'échantillon avant d'atteindre le microscope ; un décalage de phase en résulte, modifiant la position du pic de l'onde. En comparant le faisceau de lumière transmise à un faisceau de référence – plus précisément, en les faisant interférer –, on reconstitue les caractéristiques de l'échantillon.

Aucune de ces techniques n'a beaucoup fait parler d'elle. Celle de Lippmann est assez lente et minutieuse à utiliser, pour des résultats frustrants (le contraste de l'image est mauvais si l'éclairage n'est pas réglé de façon très précise). Celle de Zernike reste un outil de spécialistes, surtout mis en œuvre par les biologistes et les géologues. Ni l'une ni l'autre ne semblent exploitables à grande

échelle. Dans son discours de réception du prix Nobel, Zernike a écrit :

« Retrospectivement, je suis impressionné par les grandes limitations de l'esprit humain. Comme nous sommes rapides pour apprendre, c'est-à-dire imiter ce que d'autres ont fait ou pensé avant nous ! Et comme nous sommes lents pour comprendre, c'est-à-dire voir les connexions plus profondes. Mais là où nous sommes les plus lents, c'est pour inventer de nouvelles connexions, ou même appliquer de vieilles idées à un domaine nouveau. »

Comme ces deux techniques, l'holographie est fondée sur la manipulation des ondes et des interférences. Trois dispositifs principaux ont été élaborés de façon indépendante. Le premier est conçu

1. L'HOLOGRAMME DU PONT DE TAMPA, en Floride, est enregistré sur une plaque de 1 mètre sur 1,50 mètre, et a une profondeur apparente de 8 mètres. La réalisation de telles œuvres, destinées notamment à des expositions, a été permise par une vague d'innovations dans les années 1970.

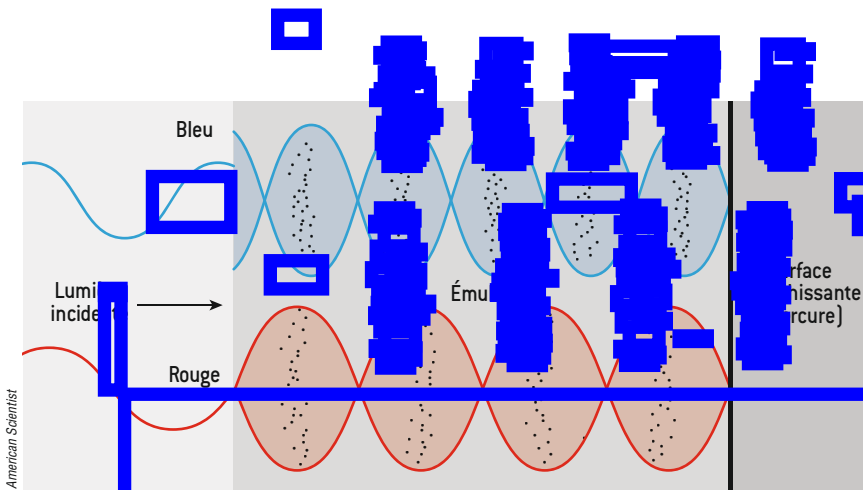
L'ESSENTIEL

✓ Un hologramme est un motif dessiné par les interférences de la lumière diffusée par un objet avec un rayon lumineux de référence. Le motif est enregistré sur une plaque. Quand on la regarde, on voit l'objet en relief.

✓ L'holographie a inspiré de nombreux artistes et suscité les attentes parfois irrationnelles.

✓ Elle a aussi donné naissance à de nombreux dispositifs pratiques, tels les hologrammes de sécurité qui équipent les cartes bancaires.

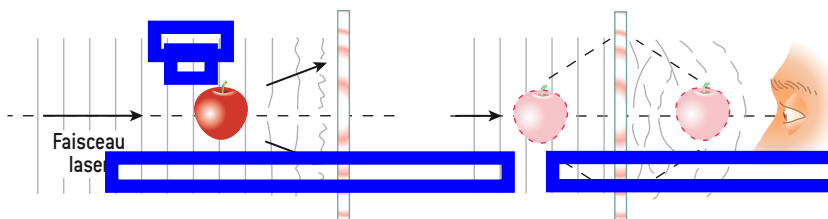
✓ Les recherches en cours visent notamment à fabriquer des mémoires holographiques.



2. UN DES PREMIERS DISPOSITIFS DE PHOTOGRAPHIE EN COULEUR, inventé par Gabriel Lippmann, est fondé sur des interférences : la lumière de chaque couleur passe par une lentille, traverse l'émulsion photographique et se réfléchit sur une surface de mercure ; les interférences des ondes incidente et réfléchie créent une onde stationnaire (le champ vibre sur place entre les positions extrêmes représentées ci-dessus). Cette onde a des pics d'intensité à des profondeurs fixes, où l'émulsion s'assombrit (amas de points). Quand la plaque développée est éclairée avec de la lumière blanche, les zones assombries renforcent la longueur d'onde originale, ce qui restitue la couleur.

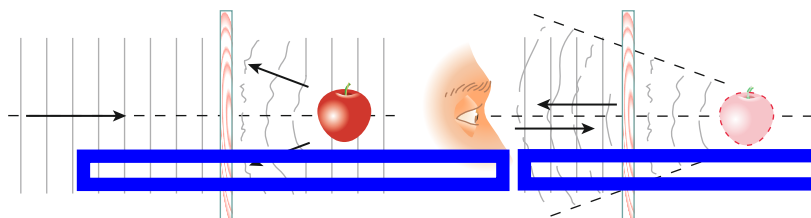
Enregistrement d'un hologramme de Gabor

Reconstruction d'un hologramme de Gabor



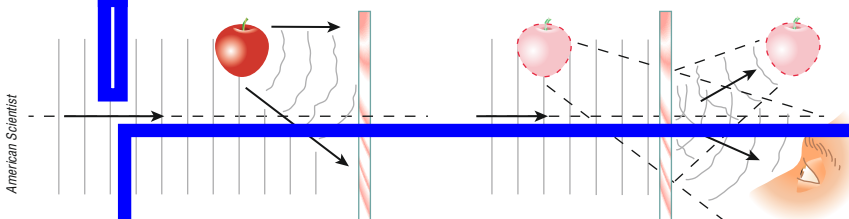
Enregistrement d'un hologramme de Denissiouk

Reconstruction d'un hologramme de Denissiouk



Enregistrement d'un hologramme de Leith-Upatnieks

Reconstruction d'un hologramme de Leith-Upatnieks



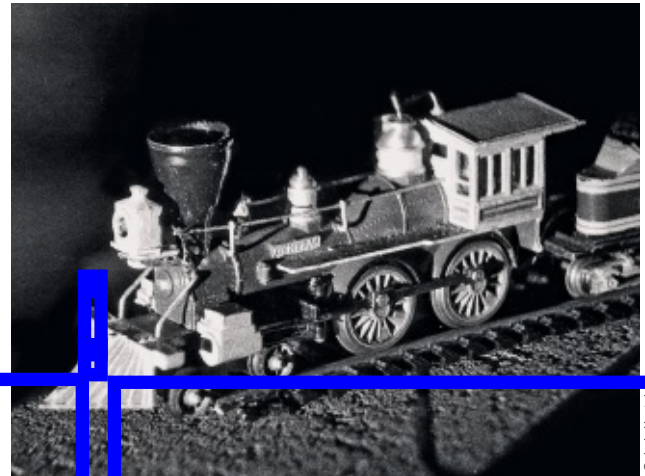
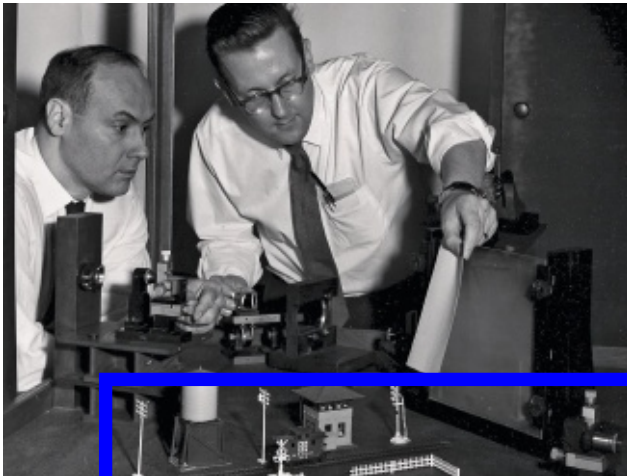
3. L'ENREGISTREMENT D'HOLOGRAMMES (à gauche) et leur visualisation (à droite) utilisent trois méthodes différentes. La lumière laser arrive par la gauche (les lignes verticales grises représentent les fronts d'onde, et la flèche la direction de propagation) et rencontre un objet qui diffuse la lumière (ici une pomme). La lumière diffusée se combine à l'onde incidente pour produire un motif d'interférences (franges rouges) sur une plaque photographique. Dans le dispositif de Denissiouk (au centre), l'objet est situé derrière la plaque, tandis qu'il est devant dans ceux de Gabor et de Leith et Upatnieks (respectivement en haut et en bas). Dans ce dernier dispositif, l'objet est décalé par rapport à l'axe central du faisceau incident. Une fois développés et éclairés de façon appropriée, les hologrammes réfléchissent (Denissiouk) ou transmettent (Gabor et Leith et Upatnieks) la lumière, ce qui reconstruit l'image de l'objet. L'hologramme de Gabor produit deux images superposées, celui de Denissiouk une seule image et celui de Leith et Upatnieks une image soit devant, soit derrière la plaque, selon l'angle sous lequel on la regarde.

en 1948 par Dennis Gabor, un physicien d'origine hongroise qui travaille pour une firme anglaise d'électrotechnique. Son dispositif sert à améliorer la qualité d'image de la première génération de microscopes électroniques et procède en deux étapes (voir la figure 3). La première est l'enregistrement : on projette un faisceau électronique sur l'échantillon à observer, qui le diffuse ; on dit aussi qu'il le diffracte (on peut se représenter les électrons comme des ondes, tout comme la lumière visible). Le faisceau diffusé interfère avec le faisceau non dévié pour produire un motif sur une pellicule photographique. Gabor nomme ce motif hologramme, mot construit à partir de racines grecques signifiant « dessin entier ». La seconde étape est le visionnage : l'hologramme est introduit dans une sorte de système de projection qui recrée une image de l'échantillon observable à travers un oculaire.

Des failles pratiques et fondamentales

L'idée est astucieuse, mais les articles de Gabor sont presque incompréhensibles pour ses contemporains, même pour des lauréats du prix Nobel tels que sir Lawrence Bragg et Max Born. Un petit groupe de recherche industrielle qui s'efforce de l'exploiter finit par considérer, vers le milieu des années 1950, que c'est une piste coûteuse et peu rentable. Les chercheurs de ce groupe, ainsi qu'une poignée d'autres, développent des failles pratiques et fondamentales. Les hologrammes de Gabor nécessitent un faisceau électronique monochromatique, mais créer une source d'électrons d'énergie constante qui serait stable pendant l'exposition (plusieurs minutes) se révèle impossible. Les chercheurs ne parviennent pas à reconstruire une image reconnaissable à partir des hologrammes résultants. Et le dispositif crée deux images, l'une semblant située en avant et l'autre en arrière de la plaque, qui se superposent et donnent un résultat confus. Au cours de la décennie suivante, Gabor, devenu enseignant-chercheur en électronique à l'Imperial College de Londres grâce à son invention, s'en déboune pour travailler dans les domaines plus fertiles de l'ingénierie télévisuelle et de la modélisation de la fusion nucléaire.

Le deuxième concept novateur apparaît vers la fin des années 1950 à Léningrad (aujourd'hui Saint-Petersbourg), où un doctorant, Iouri Denissiouk, cherche à



4. EMMETT LEITH ET JURIS UPATNIEKS (à gauche) ont créé l'une des principales techniques de réalisation d'hologrammes. Leur hologramme d'un train miniature (à droite), produit en 1965, était l'un des premiers de ce type à être vu par un large public. L'image était rognée

enregistrée et à reproduire les caractéristiques complètes d'un champ d'ondes lumineuses. Il souhaite capturer un front d'onde (une surface d'égale phase) en un point arbitraire de l'espace, comme le fait l'œil humain, afin de visualiser une scène tridimensionnelle en couleur. Denissiouk finit par reprendre et généraliser certains aspects de la photographie de Lippmann. Il crée des ondes stationnaires dans une émulsion photographique en faisant interférer la lumière incidente avec celle qui est réfléchie par l'objet (voir la figure 3). Il enregistre ainsi le front d'onde lumineux, sous forme d'un motif d'interférences, en utilisant de la lumière monochromatique. Le motif enregistré peut ensuite réfléchir la lumière pour recréer le front d'onde.

Le dispositif de Denissiouk a l'avantage d'éviter les images superposées de Gabor, mais il est confronté à des problèmes pratiques similaires. Il a besoin de lumière cohérente, c'est-à-dire dont la phase est assez régulière pendant le temps d'exposition, pour que des interférences se produisent. Or les sources disponibles sont peu lumineuses et insuffisamment cohérentes. En conséquence, il ne parvient à enregistrer que des images d'objets faisant moins d'un millimètre d'épaisseur. En outre, il pense – à tort – que ces objets doivent être très réfléchissants. Il n'enregistre donc que des images de miroirs très minces – qui réfléchissent la lumière de la même façon que l'original, de sorte qu'un homme qui regarde l'image voit non seulement le miroir, mais aussi sa propre figure reflétée – ou d'objets de ce type. Ses contemporains rejetant à tort la méthode de Gabor, il se tourne vers d'autres travaux au début des années 1960.

La troisième idée novatrice est encore moins liée à l'optique classique. Dans les années 1960, aux Laboratoires Willow Run (dédiés aux contrats militaires) de l'Université du Michigan, le jeune ingénieur électrique Emmett Leith travaille à la conception de nouveaux radars. Leith cherche des méthodes pour traiter les données de ce qu'on nommera plus tard le radar à visée latérale ou à synthèse d'ouverture. Ce radar met des ondes électromagnétiques et capte leurs échos multiples grâce à une antenne aérienne. Les données enregistrées sur une pellicule ressemblent aux figures d'interférences des hologrammes. Elles sont ensuite combinées et traitées pour créer une image du terrain.

Une nouvelle science appliquée

Pour ce faire, un système électronique compliqué est imaginé, où le signal doit être enregistré sur bande magnétique et filtré analogiquement, grâce à des condensateurs, des bobines d'inductance et d'autres composants électriques; un recours aux ordinateurs numériques assez primitifs qui commencent à être disponibles à cette époque est aussi envisagé. Mais entre 1954 et 1959, Leith et ses collègues conçoivent une nouvelle solution, utilisant un système de traitement optique. Ils mélangent la théorie de l'optique physique à celle des télécommunications, qui s'est développée après guerre, pour créer une science appliquée nouvelle et puissante (aussi explorée indé-

pendamment par une poignée de chercheurs français).

À l'époque, la sûreté militaire empêche la publication de leurs résultats. Leith écrira plus tard : « En réalité, l'holographie n'était pas en recul dans la période 1955-1962, comme on pourrait le croire à tort au regard de la littérature publiée. D'une certaine façon, elle était devenue clandestine. » Pendant son temps libre, Leith continue à explorer la nouvelle science appliquée en particulier après avoir découvert les travaux de Gabor. En 1961, avec son collègue Juris Upatnieks, il élabore une méthode pour encoder, puis reconstruire une image sur un transparent photographique par le processus d'hologramme en deux étapes. Ils résolvent le problème des images superposées en s'inspirant des sciences de la télécommunication (de même que les communications radio reposent sur des ondes qui varient dans le temps, l'information holographique est fondée sur des motifs holographiques variant spatialement). Le motif d'interférences de l'hologramme résulte du mélange de deux signaux, une onde de référence (l'onde monochromatique de départ) et une onde échantillon (issue de la diffraction ou de la réflexion de l'onde de référence par l'objet). En décalant le faisceau de référence et celui d'échantillon afin qu'ils ne soient plus parallèles, les chercheurs réussissent à séparer les deux images : lors de la visualisation, on observe soit l'une, soit l'autre, en fonction de l'angle de vue.

La méthode de Leith et Upatnieks est nommée photographie sans lentille. L'Institut américain de physique. Dans un

premier temps, elle n'a qu'un succès restreint, car elle pâtit également des défauts des sources lumineuses disponibles. La rupture se fera avec l'arrivée des lasers au début des années 1960. En 1963, Leith et Upatnieks s'en servent comme source lumineuse pour enregistrer et reconstruire les images d'objets en trois dimensions. Le réalisme des images obtenues est saisissant : les hologrammes à laser enregistrés sur des plaques sont impossibles à distinguer d'une scène réelle vue à travers une fenêtre. En outre, leur visualisation ne nécessite pas de lunettes spéciales, comme pour les films en trois dimensions arrivés sur le marché un peu plus tôt, ou les dispositifs stéréoscopiques du XIX^e siècle ; ces deux dernières techniques consistent à présenter des images différentes à chaque œil, pour permettre au cerveau de reconstituer le relief. Les deux années suivantes, la nouvelle technologie se fait connaître des ingénieurs et des scientifiques du monde entier.

Dès 1966, on comprend que les travaux de Gabor, de Denissiouk et de Leith et Upatnieks peuvent être rassemblés au sein d'un même domaine, que l'on nomme holographie. Les travaux de Denissiouk sont réhabilités dans son pays. Les recherches soviétiques dans ce domaine sont soutenues par le gouvernement, qui en fait une vitrine scientifique dans le cadre de la guerre froide. Quant à Gabor, qui considérait pour tant ses travaux comme un échec, il sera le seul lauréat du prix Nobel 1971 de physique, une victoire controversée. Simple nou-

veauté de promoteuse à visée théorique, 20 ans plus tôt, l'holographie est devenue un domaine en plein essor, dont on s'arrache la paternité.

À partir du milieu des années 1960, universités et laboratoires industriels se bousculent pour explorer l'holographie, cherchant à lui trouver des applications et à l'améliorer. Le nombre de publications sur le sujet est multiplié par 25 avant la fin de la décennie, et les entreprises qui misent sur son exploitation commerciale se multiplient. Les Laboratoires *Willow Run* ont une longueur d'avance. Ils inventent des techniques d'interférométrie holographique pour visualiser et quantifier les déformations d'échantillons mécaniques, telle la dilatation due à la chaleur. Leur méthode peut aussi révéler précisément les contours d'un volume, les modes de vibration de pièces utilisées dans les bâtiments ou les machines, les détails des écoulements aéronautiques, des défauts de soudure... Les mesures faites par holographie offrent une sensibilité inégalée.

Les innovations s'enchaînent

Les Laboratoires *Willow Run* donnent rapidement naissance à des sociétés commerciales, celle *Conductron Corporation*. Celle-ci réalise une série d'innovations. À la fin des années 1960, elle produit de gros hologrammes de démonstration pour les compagnies automobiles et des hologrammes de série

insérés dans une encyclopédie scientifique. Elle développe un laser à impulsions, qui émet une série de flashes et permet pour la première fois d'enregistrer des hologrammes de personnes vivantes ; auparavant, on utilisait des objets inanimés, car le sujet devait rester absolument immobile. Il sert aussi à analyser des phénomènes fugaces, tels un impact de balle, un mélange de combustibles ou la formation de nuages. L'entreprise crée des hologrammes à plusieurs couleurs en combinant des lasers rouge, vert et bleu pour l'enregistrement et le visionnage. Elle met au point les techniques nécessaires à la réalisation de courts dessin animés holographiques. Kip Siegel, le fondateur de *Conductron*, prédit un grand avenir commercial aux hologrammes. Il annonce la télévision, le cinéma et les films amateurs holographiques pour la décennie à venir, et charge publiquement ses employés de se préparer à « holographier » les prochains jeux Olympiques.

L'holographie devient plus familière, et on commence à comparer son évolution à celle de la photographie. Les premiers équipements étaient chers, nécessitaient des temps d'exposition longs, et étaient techniquement limités ; en quelques années des hologrammes plus rapides, de meilleure qualité, moins chers et plus variés deviennent disponibles, et l'exportation descend des chercheurs vers les ingénieurs et les entrepreneurs.

Cependant, les prédictions de Siegel dépassent de beaucoup les extrapolations techniques les plus optimistes, et les ingénieurs sont plus prudents que les commerciaux. Elles reposent sur une foi dans le progrès scientifique, technique et économique largement partagée par ses contemporains. Elles sont aussi alimentées par les rapides progrès techniques et les inventions qui continuent de s'enchaîner dans le domaine de l'holographie.

Aux États-Unis, au moins trois équipes indépendantes redécouvrent les hologrammes de Denissiouk, dont les travaux sont passés inaperçus à l'Ouest. Bien qu'enregistrés avec un laser monochromatique, les hologrammes de ce type peuvent être visionnés avec une lumière blanche, comme les photographies de Lippmann. Ils fournissent alors une image en trois dimensions, qui apparaît derrière la plaque. L'enregistrement est aussi très simple : il suffit de placer la plaque photographique devant l'objet à enregistrer, puis de les éclairer tous deux avec une lumière blanche.



5. DES HOLOGRAMMES DE SUJETS MOBILES peuvent être créés grâce à des lasers à impulsions. L'un des plus anciens montre un homme qui utilise une perceuse (*ci-contre*). Les dessins à sa surface indiquent que l'homme a bougé entre deux flashes du laser lors de l'enregistrement. Cet hologramme ainsi que tous ceux de type *Lippmann* nécessitent des lasers pour être visionnés, sinon la plaque holographique (*ci-dessus*) ne ressemble pas à l'image d'origine.



© Jonathan Ross/Hologrammes créés par la Multiplex Company

laser. Le procédé est alors exploité par les musées scientifiques, qui réalisent des hologrammes de leurs collections : ceux-ci connaissent une popularité croissante à partir des années 1970 dans le cadre d'expositions itinérantes.

D'autres types d'hologrammes en lumière blanche sont élaborés. Les plus simples sont enregistrés en utilisant une lentille pour focaliser la lumière diffractée par l'objet dans le plan de la plaque holographique. Les hologrammes de ce type, dits à plan-image, sont de plus en plus explorés à partir de 1966. Éclairés avec une source de lumière blanche, ils créent une image qui semble chevaucher la plaque, et dont les points les plus éloignés apparaissent plus flous que les plus proches. En adaptant légèrement le dispositif optique, on peut faire apparaître l'image devant la plaque holographique, comme si elle était suspendue dans l'espace en face du spectateur.

De telles images impressionnent le public, qui se prend à espérer la concrétisation des hologrammes imaginés par le cinéma des années 1970, notamment dans *La Guerre des étoiles*, et par la télévision des années 1980, par exemple dans *Star Trek: La nouvelle génération*. Malheureusement, les dispositifs présentés dans ces films, qui projettent une image holographique loin du spectateur sans plaques physiques, sont irréalistes : les hologrammes nécessitent une plaque d'enregistrement et apparaissent toujours entre cette plaque et le spectateur.

Une variante intéressante des hologrammes est développée en 1968 par Stephen Benton, travaillant alors pour la Société Polaroid, et rendue publique au début des années 1970. Généralement qualifié d'arc-en-ciel, son hologramme est

fendu horizontalement, ce qui entraîne des propriétés optiques inédites : lorsqu'on bouge la tête de bas en haut, on observe un changement de couleur de l'image (car la fente disperse les longueurs d'onde de la lumière blanche), au lieu de voir passer l'objet de premier plan comme dans les autres types d'hologrammes.

La dernière addition majeure à la boîte à outils de l'holographie pendant les années 1970 est celle du stéréogramme holographique, développé par le physicien Lloyd Cross. Dans sa forme la plus simple, ce stéréogramme est une série d'hologrammes de Leith-Upatnieks juxtaposés, chacun formant une bande verticale. Si on courbe le stéréogramme en un cylindre, chaque œil voit des bandes différentes ; ainsi, une scène tridimensionnelle est reconstituée. L'avantage d'un stéréogramme est que chacun des hologrammes qui le composent peut être enregistré à partir de images bidimensionnelles d'un film tourné de façon classique.

Dans les années 1980, de nouvelles méthodes de fabrication permettent de produire des hologrammes de réflexion bon marché à partir de modèles : au lieu de créer un motif d'interférences dans la profondeur d'un matériau photosensible, telle une émulsion photographique, on « sculpte » ce motif à la surface du matériau. Dès lors, on peut le reproduire en masse par des techniques d'estampage. On obtient des images peu esthétiques, mais au relief impressionnant. L'holographie trouve alors plusieurs nouvelles applications, telles que la publicité dans les magazines et les dispositifs anticounterfeiting appliqués sur les emballages ou les cartes bancaires. Depuis, les hologrammes sont partout.

6. LE STÉRÉOGRAMME HOLOGRAPHIQUE

Le plus connu des années 1980, *Le baiser II*, était enroulé sur un cylindre. Lorsqu'on tourne le cylindre, on voit les images ci-dessus, en relief, qui se succèdent.

L'AUTEUR



Sean F. JOHNSTON est enseignant-chercheur en histoire des sciences et de la technologie à l'université de Glasgow, en Écosse.

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

BIBLIOGRAPHIE

S. A. Benton et V. M. Bove Jr., *Holographic Imaging*, Wiley-Interscience, 2008.

S. Johnston, *Holographic Visions : A History of New Science*, Oxford University Press, 2006.

U. Schnars et W. Jüntner, *Digital Holography : Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction and Related Techniques*, Springer, 2004.

J. Ludman et al. (eds.), *Holography for the New Millennium*, Springer, 2002.

Dès la fin des années 1960, l'holographie a dépassé le cadre scientifique. De petites expositions publiques d'hologrammes sont présentées dans des laboratoires universitaires de physique, et les journaux décrivent les travaux de Leith et Upatnieks à un public enthousiaste. En avril 1980, *Pour la Science* expliquait même dans sa rubrique *Expériences d'amateur* comment enregistrer et visionner des hologrammes à l'aide de lasers à diode. Quelques artistes commencent à s'intéresser à cette nouvelle technologie, en particulier ceux des mouvements *Art et Technologie* et *Art et Science*...

Bien que les hologrammes aient impressionné les premiers spectateurs, leurs sujets (en général des natures mortes improvisées à partir d'équipements de laboratoire ou de bibelots) l'assent rapidement. S'ouvre alors une phase d'exploration esthétique. Certains comparent le potentiel de l'holographie artistique au travail d'Andy Warhol et de Robert Rauschenberg. Scientifiques et artistes coopèrent au sein de cette nouvelle discipline. L'artiste Bruce Naumann, par exemple, utilise le laser à impulsions de *Conductron* pour enregistrer ses grimaces.

Certains pionniers de la discipline ont un bagage technique associé à des dispositions artistiques. Ainsi, Lloyd Cross, après avoir travaillé aux Laboratoires *Willow Run* et fondé une des premières entreprises de lasers, rejoint la firme *Conductron*, puis invente un appareil pour réaliser des spectacles à effets de lumière et coproduit une des premières expositions d'art holographique, *N-dimensional Space*, au Musée d'art

de Finch College, à New York, en 1970. En 1968, il imaginait l'holographie comme «un artisanat, un art ou un commerce».

En 1971, Cross s'installe avec d'autres artistes à San Francisco, où ils fondent une école d'holographie pour le grand public. Bientôt envahie d'étudiants, l'école offre une vision contre-culturelle de l'holographie, limitant l'enseignement technique à l'épanouissement personnel, les états modifiés de conscience et même les expériences psychédélices. Ses membres développent un équipement bon marché facilement transportable, ce qui met un terme à l'exclusivité des laboratoires scientifiques et démocratise l'accès à la technologie. D'autres écoles d'holographie s'implantent rapidement à New York, Chicago et, dès la fin des années 1970, dans toute l'Europe.

Le boom et déclin des hologrammes sur le marché de l'art

Malgré le déclin des innovations commerciales à la fin des années 1960, la diffusion des hologrammes auprès du public augmente exponentiellement à la fin des années 1970, où fleurissent quelque 500 expositions. Celles-ci créent une demande chez les consommateurs, et les hologrammes de *pop art* alimentent une véritable industrie.

À la fin des années 1980, le succès de cette forme d'art décroît. Cela va de pair avec l'arrivée des hologrammes produits en masse et les compromis qui en résultent en termes de qualité. En outre, les holo-

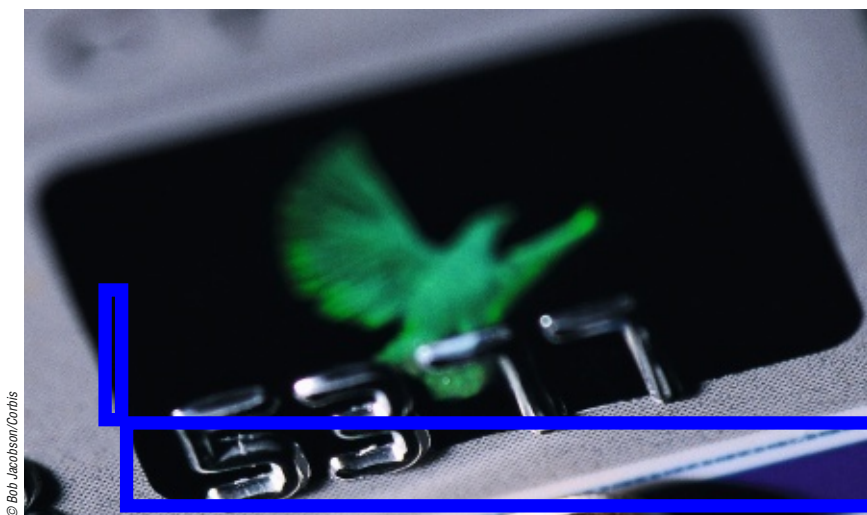
grammes ne nécessitant pas de lasers impressionnent moins le public, qui ne les associe plus au progrès. Et quand ils commencent à orner les encarts publicitaires des magazines, les emballages de dentifrice et les passeports de sécurité des cartes de crédit, le marché artistique semble condamné.

Un tel destin n'est pas rare en science et en technologie. À certains égards, le désintérêt des artistes et des consommateurs pour l'holographie est à rapprocher du sort des autres techniques 3D, telle la stéréoscopie. Inventée et commercialisée à grande échelle au XIX^e siècle, la stéréoscopie a été améliorée au début du XX^e siècle, grâce aux techniques d'impression en couleur, avant d'être recyclée en jouet pour enfants dans les années 1930. De même, les hologrammes se font connaître comme phénomène de galerie, avant de devenir une forme d'art pour la maison et de finir relégués aux albums d'autocollants pour enfants.

Aujourd'hui, l'holographie reste présente dans l'imaginaire collectif, mais de façon imprécise. On qualifie souvent à tort d'hologrammes certaines images en trois dimensions, notamment celles de personnes en mouvement. Un exemple célèbre est la projection sur un podium d'une image d'un mannequin Kate Moss par le grand couturier Alexander McQueen. L'image était en fait créée par une technique de projection, faisant intervenir un jeu de reflets sur un miroir – une technique dite du fantôme de Pepper, du nom de son inventeur au XIX^e siècle.

Comment expliquer le déclin de l'holographie dont les possibilités semblaient inépuisables à la fin des années 1960 ? Les efforts de recherche pendant les phases les plus actives ont conduit à des études redondantes, à une surabondance de publications et à une confusion sur le plan de la propriété intellectuelle (ce qui posait problème pour les brevets et entravait la commercialisation). Les promesses de contrats étant peu respectées, le sujet a acquis une mauvaise réputation. Par conséquent, la terminologie a changé plusieurs fois pour éviter de discréditer les nouvelles recherches, rendant l'évolution du domaine difficile à suivre, aussi bien pour ses acteurs que pour les analystes.

Malgré tout, la recherche et le développement en holographie se poursuivent plus discrètement aujourd'hui. Au cours de la dernière décennie, les ordinateurs ont beaucoup apporté au domaine. Les hologrammes



© Bob Jacobson/Corbis

7. DES HOLOGRAMMES DE SÉCURITÉ, très difficiles à contrefaire, sont inclus notamment sur les cartes bancaires et les emballages. Avec l'arrivée de ces images d'assez mauvaise qualité dans les années 1980, les hologrammes ont envahi notre vie quotidienne.

sance de calcul, on synthétise des hologrammes de plus en plus vite; on peut ensuite soit les enregistrer sur des pellicules, comme le fait la Société *Zebra Imaging* (voir la figure 8), soit les projeter sur un écran en temps réel grâce à divers dispositifs. Toutefois, les calculs sont très compliqués, et la transmission en temps réel d'hologrammes numériques de haute qualité (le vieux objectif de la télévision holographique) continue à se heurter à des problèmes techniques.

Un autre objectif à long terme s'est rapproché: le stockage de données *via* des hologrammes inscrits dans des matériaux tels que des photopolymères (qui se transforment sous l'action de la lumière) et des cristaux. De tels systèmes pourraient dépasser largement les capacités de stockage des technologies optoélectroniques actuelles, tels les DVD-ROM, mais on ne sait pas encore effacer des données ni les réécrire aussi facilement qu'il y a sur les disques magnétiques.

D'autres applications continuent de se développer. Les hologrammes de sécurité évoluent rapidement pour conserver une longueur d'avance sur les contrefaçons. De nombreux dispositifs, tels des écrans radar



8. CET HOLOGRAMME présente une vue en couleur d'un modèle infographique de Seattle.

Le motif a été créé par ordinateur. L'utilisation de l'informatique rend la synthèse d'hologrammes plus rapide, même si la quantité de calculs nécessaires reste une difficulté.

d'avions ou des lecteurs de codes-barres, incluent des composants dits holographiques: ce sont des éléments dont la surface est sculptée comme celle des hologrammes, ce qui leur confère des propriétés optiques particulières; un seul d'entre eux peut par exemple combiner les propriétés d'un miroir, d'une lentille et d'un prisme.

Leith affirmait que les méthodes de manipulation de la lumière développées par l'holographie continueraient à donner naissance à de nouvelles applications, qu'il regroupait sous le terme de transholographie. Citons par exemple la conjugaison de phase, une méthode corrigeant les déformations induites par les fronts d'ondes optiques lors de la traversée d'un milieu; on améliore ainsi les images de l'espace lointain qui arrivent sur les télescopes après avoir franchi l'atmosphère terrestre. En outre, les principes holographiques sont maintenant appliqués avec succès à d'autres formes d'ondes, telles les ondes électroniques auxquelles s'intéressait Cabot

il y a 65 ans. Bien que moins sous les feux de la rampe, l'holographie est donc encore bien vivante...

VOYAGER DANS LE TEMPS

La marche des sciences

Aurélié Luneau
14h/15h - jeudi
En partenariat avec *Pour la Science*

franceculture.fr

© 2012 France Culture. Tous droits réservés. Photo: M. D. / Dreamstime.com

L'OBSERVATOIRE le plus

1. LES ENCEINTES CONCENTRIQUES

de La Fortaleza constituent l'une des structures les plus étonnantes du site de Chanquimó.

La nature de cette imposante structure large de 300 mètres est incertaine, mais il est probable qu'il s'agisse d'un temple fortifié.

SOLAIRE

ancien d'Amérique

Iván Ghezzi et Clive Ruggles

Occupé dès le IV^e siècle avant notre ère, le site pré-inca de Chanquillo, au Pérou, est doté d'un observatoire.

Tout indique qu'il servait à établir un calendrier dans le cadre d'un culte solaire.

L'ESSENTIEL

✓ Situé dans le désert côtier d'Arequipa, sur la côte Nord du Pérou, Chanquillo est un immense site dédié à un culte solaire pratiqué il y a 2 300 ans.

✓ Chanquillo comportait un temple fortifié et une colline crénelée de tours servant à repérer les événements solaires et à diviser l'année en périodes distinctes.

✓ Les restes d'offrandes retrouvés suggèrent qu'une élite guerrière avait créé et entretenait, à la faveur de grandes cérémonies, un culte solaire destiné à maintenir son pouvoir.

Service aérotopographique national, Pérou

Sur la côte péruvienne Nord, à quelque 400 kilomètres de Lima, se trouve le centre cérémoniel de Chanquillo. Ce vaste complexe d'édifices et de places serait vieux de 23 siècles. Sa fonction était depuis longtemps l'objet de nombreuses interprétations. On a ainsi supposé qu'il pourrait avoir servi de forteresse, de refuge voire être une sorte de temple cloîtré où l'on se livrait à des batailles rituelles. Les recherches, dont nous allons exposer ici les principaux résultats, nous conduisent pour notre part à penser que Chanquillo est le plus ancien observatoire solaire d'Amérique et qu'il était un lieu dédié au culte solaire.

En archéo-astronomie (archéologie des astronomies du passé), le terme d'observatoire est à employer avec précaution, car il évoque de supposés anciens « astronomes ». Les observatoires du passé nous renseignent plutôt sur la façon dont les Anciens percevaient, ordonnaient et contrôlaient le monde.

Nous savons aujourd'hui que les calendriers fondés sur l'observation des positions du Soleil sur l'horizon – ce que l'on nomme les calendriers d'horizon –

jouaient un grand rôle chez les peuples américains. Dans la civilisation maya, par exemple, la détermination et la prédiction des cycles célestes servaient davantage à dire l'avenir ou à la divination qu'à réguler les activités saisonnières. Dans d'autres régions de l'Amérique centrale, l'étude de l'orientation des édifices sacrés et de la disposition des cités suggère l'existence de calendriers d'horizon attribuant une importance particulière à certaines dates clés. Outre les solstices, ces dates comprenaient les passages du Soleil au zénith et d'autres encore, dérivées des premières mais toutes inscrites dans l'entrecroisement complexe des cycles du calendrier méso-américain.

En ce qui concerne les Andes, les chroniques espagnoles révèlent l'existence chez les Incas de rites et de croyances cosmologiques en rapport avec un culte solaire d'État, qui donnait une grande importance aux cycles astronomiques et au calendrier. Ce culte solaire aurait été créé par l'élite inca pour cultiver l'idée de son origine divine, centraliser le pouvoir et légitimer son autorité. Plusieurs indices historiques et l'étude des alignements de bâtiments

sacrés – les *ceques* – dans la région de Cuzco, la capitale de leur empire, suggèrent que les Incas inscrivaient leur calendrier dans le paysage.

À ce propos, une question fondamentale est la relation à la nature des croyances cosmologiques et des pratiques calendaires dans les sociétés pré-incas. Se pourrait-il qu'en Amérique du Sud, les pratiques d'observations et le culte solaire soient bien plus anciens qu'on ne le pensait ? De telles questions nécessitent de remonter dans le temps bien avant les premiers chroniqueurs espagnols, de sorte que l'on ne peut tenter d'y répondre que par les moyens de l'archéologie. Cela pose les problèmes récurrents en archéo-astronomie de l'interprétation des alignements et de la structure des sites. Dans ce contexte, le site de Chanquillo est une exception puisqu'il est très clair : nous pouvons aujourd'hui affirmer qu'il servait à l'observation des levers et couchers du soleil tout au long de l'année.

Chanquillo se trouve dans le désert d'Ancash au débouché de la vallée de la rivière Camá, sur la côte pacifique Nord du Pérou, dans un paysage aride de dunes, de sable, de roches et de forêts de caroubiers américains (*Prosopis pallida*). Ce site de 400 hectares est composé de multiples édifices, de places et de cours construits en pierre de taille et mortier de terre. La *Fortaleza* (« La forteresse »), son édifice le

plus connu, est une imposante structure de 300 mètres de long située en haut d'une colline et défendue par de grandes murailles, des parapets, des accès contrôlés et, en toute probabilité, par un fossé (voir la figure 1). Elle a été l'objet de nombreuses interprétations : forteresse, refuge ou même lieu de culte... Nous pensons pour notre part qu'il s'agit d'un temple fortifié.

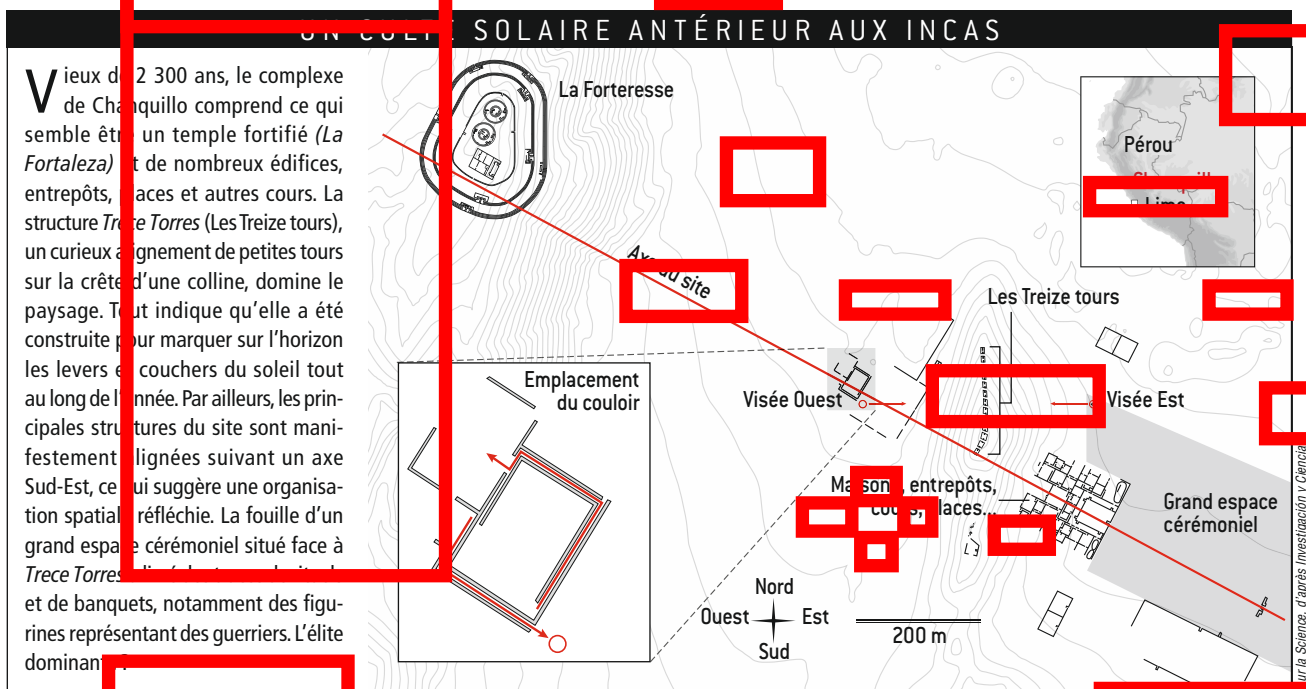
La crête aux 13 tours

Une zone moins connue du site est une vaste aire de vocation publique et cérémonielle comportant de nombreux bâtiments, cours, places publiques et autres entrepôts (voir l'encadré ci-dessous). Nommée *Trece Torres* (« Treize tours »), sa structure la plus remarquable consiste en une série de 13 petites constructions cubiques en pierre et mortier de boue alignées sur la crête d'une petite colline, qui barre l'horizon à peu près au centre du site de Chanquillo. Disposées à intervalles à peu près réguliers compris entre 4,7 et 5,1 mètres, ces « tours » forment une structure crénelée orientée Nord-Sud, même si les positions des trois dernières tours (les tours 11, 12, 13 si l'on compte depuis le Nord) traduisent une inflexion vers le Sud-Ouest.

Bien que le bâti de ces structures soit en général plutôt bien conservé, les angles extérieurs et certains murs internes sont en partie effondrés. Les bases des tours

sont soit rectangulaires, soit en forme de losange ; leurs hauteurs, de deux à six mètres, dépendaient de la pente où elles furent édifiées ; leur volume varie de 150 à 700 mètres cubes. Chaque tour comporte sur ses faces Nord et Sud deux escaliers, plutôt bien conservés, qui mènent au toit. Au contraire de l'escalier Sud dirigé vers l'Est, l'escalier Nord se trouve au centre de la structure. Couverts de sable ou de gravier, les toits sont plutôt bien conservés. Les escaliers qui y mènent suggèrent que ces derniers étaient employés à quelque chose d'important (voir la figure 2).

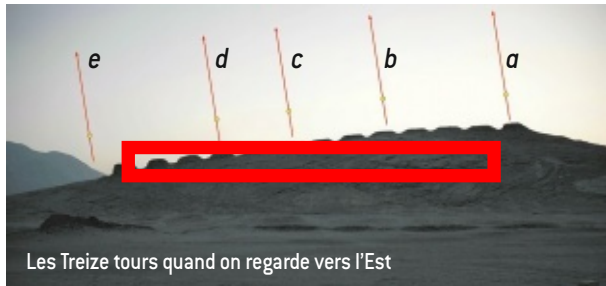
À quelque 250 mètres à l'Ouest de la colline crénelée se trouvent trois enceintes rectangulaires adjacentes. Au Nord-Est de ce groupe, l'une d'elles – qui pourrait être aussi un bâtiment – a ceci de particulier qu'elle est entourée par un couloir de 40 mètres de long et de 2,5 mètres de large, soigneusement enduit et peint en blanc. Il conduit à l'intérieur de l'enceinte qu'il entoure à la face Nord-Ouest, dont l'accès était lui aussi contrôlé par un mur. De là, une porte, puis un nouveau couloir mènent directement vers le Sud-Est jusqu'à une enceinte mesurant 53,6 par 36,5 mètres, elle aussi construite, enduite et peinte en blanc et recouverte, d'où l'on fait directement face aux treize tours. D'environ deux mètres de haut, les murs qui bordaient le couloir empêchaient d'apercevoir les Treize tours jusqu'au dernier moment. Autant



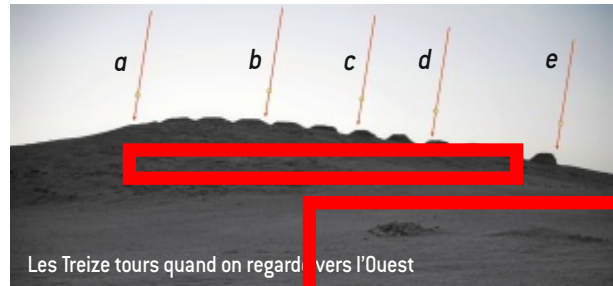
LEVERS ET COUCHERS DU SOLEIL SUR LES TOURS

Les positions du Soleil au levant et au couchant lors des dates solaires remarquables vers 300 avant notre ère sont indiquées ici par des flèches rouges. Ainsi, lors du solstice d'été – le 24 décembre de l'an –300, car nous sommes dans l'hémisphère Sud –, le Soleil se levait juste au-dessus de la tour Sud (a) ; lors du solstice d'hiver – le 27 juin de l'an –300 –, il se levait à l'aplomb du versant de la colline *Mucho Malo* donnant sur les Treize tours (e) ; les positions du Soleil à l'équinoxe (c) et à l'été (d) sont également indiquées. Les positions du Soleil à l'équinoxe (c) et à l'été (d) sont également indiquées. Les positions du Soleil à l'équinoxe (c) et à l'été (d) sont également indiquées.

étaient peut-être repérées, par exemple celle du passage du Soleil au zénith (b) – le 28 février – ou au nadir (d, le zénith de l'antipode) – 18 avril. Le passage au zénith ne se produit qu'entre les deux équinoxes comme au Pérou. Mais la seule observation des tours ne permet pas de déterminer le passage au zénith ou au nadir. Ainsi, seuls certains de ces événements remarquables de l'année solaire étaient observés. Les positions des tours et leurs espacements permettaient de mesurer les divisions du calendrier utilisé par les membres de la culture pré-inca à l'origine de Chanquillo.



Les Treize tours quand on regarde vers l'Est



Les Treize tours quand on regarde vers l'Ouest



LE SOLEIL DU 21 JUIN se lève sur *Mucho Malo*, la colline lointaine servant probablement de quatorzième tour. Depuis l'an 300 avant notre ère, le Soleil au solstice d'hiver n'a bougé que de 0,3 degré sur l'horizon vers la droite, de sorte que la structure crénelée de Chanquillo reste utilisable. Plus tard dans l'année, le Soleil à son lever est soit caché par une des tours, soit logé entre deux d'entre elles.

Sauf mention contraire, toutes les images appartiennent aux auteurs.

de constatations qui suggèrent que ce couloir servait à contrôler l'accès au secteur des Treize tours. De fait, des fouilles pratiquées près de l'ouverture du couloir ont mis au jour des restes d'offrandes – céramique, coquillages et outils de pierre –, ce qui suggère un rituel associé à la traversée du couloir. Le couloir est nommé « point d'observation Ouest » le lieu où l'on débouchait du couloir.

Un vaste complexe cérémoniel

À l'Est des tours se trouve un grand espace ouvert comportant notamment un complexe de pièces reliées entre elles, des entrepôts ainsi que des édifices divers, le tout autour d'une place. Cette grande aire n'est pas délimitée par des murs ou des bâtiments, mais on la distingue au fait que le terrain qui la constitue a manifestement été en partie aplani, remblayé et débarrassé de ce qui l'encombrait. Des vestiges de flûtes et de coquillages ont été retrouvés dans différents secteurs de cette place, qui é-

taient des offrandes ; aux alentours, plusieurs récipients contiennent des restes de poterie domestiques, de flûtes et de maïs. Bref, tout suggère qu'il s'agit là d'un vaste espace cérémoniel où se déroulaient des cérémonies et des banquets.

Par son élévation et son caractère monumental, la colline aux Treize tours constitue un élément dominant du paysage, clairement visible depuis de nombreux secteurs du grand espace cérémoniel. Sur l'un des bords de cet espace, une petite construction a été érigée. Elle est d'un intérêt majeur, car son emplacement est le symétrique du point d'observation Ouest par rapport à la colline portant les Treize tours. Ces dernières sont tout à fait visibles sur l'horizon depuis l'intérieur de ce petit bâtiment.

Les fouilles effectuées dans cette zone ont livré les fondations d'une enceinte rectangulaire de six mètres de large, mal conservée car il semble qu'après avoir été abandonnée, elle a été démontée progressivement jusqu'à sa base. Comme l'accès au point d'observation Ouest, l'accès à cette enceinte était restreint par un petit mur de clôture.

Nous pensons que cette structure constituait un point d'observation à l'Est, symétrique au point d'observation Ouest. En effet, l'angle couvert par les tours sur l'horizon depuis ces deux points d'observations couvre les positions du lever et du coucher du soleil tout au long de l'année. Cette constatation suggère que la colline crénelée des Treize tours servait à observer la course solaire, une hypothèse confirmée par la comparaison des positions des tours avec les lieux où, d'après les calculs, le Soleil apparaissait vers 300 avant notre ère.

Ainsi, la position de la tour située le plus au Sud correspond à celle du Soleil au solstice d'hiver. Par ailleurs, près de la tour la plus au Nord, le profil de la colline coupe celui d'une autre colline, distante de trois kilomètres et nommée *Mucho Malo*, exactement au point où se levait le Soleil au solstice d'été vers 300 ans avant notre ère (voir l'encadré ci-dessus). Depuis, la position du soleil au solstice d'été n'a d'ailleurs varié que de 0,3 degré sur l'horizon : autant dire quasiment pas. Le fait que le profil de cette colline s'oppose de façon assez

LES AUTEURS



Iván GHEZZI est professeur d'archéologie à l'Université catholique pontificale du Pérou à Lima.

Clive RUGGLES, astrophysicien, est professeur émérite de l'Université de Leicester, au Royaume-Uni.



2. CET ESCALIER NORD est l'un des deux escaliers de chaque tour. Leur existence suggère que des activités importantes se déroulaient au sommet des tours.



3. CES FIGURINES DE GUERRIERS EN TERRE CUITE ont été restituées par un artiste à partir de fragments de poteries. Elles suggèrent qu'au sein de la population pré-inca qui construisit Chanquillo, une caste guerrière avait acquis un haut rang social.

symétrique à celui des Treize tours suggère que le point d'intersection des deux profils remplace la tour qui aurait pu être ajoutée si *Mucho Malo* n'avait pas existé. De fait, le Soleil apparaît au solstice d'hiver derrière la structure naturelle qu'est *Mucho Malo* et non derrière une tour (voir l'encadré page précédente).

À cause de l'inflexion vers le Sud-Ouest de la colline, la partie du profil crénelé correspondant aux tours 11, 12 et 13 n'est pas visible du point d'observation Est. On peut supposer que seul le sommet de la tour 12 était bien visible, bien que son mauvais état de conservation empêche de s'en assurer. De cet endroit, le soleil couchant au solstice d'hiver pouvait sans doute être observé sur le côté gauche de la tour 12. Au moment du solstice de juin, le Soleil se couchait à droite de la première tour.

Quand le Soleil commençait à s'éloigner de ses positions extrêmes dans les jours suivant les solstices, les tours permettaient de décrire le parcours du Soleil le long de l'horizon avec une précision correspondant à la variation observée en trois jours. Si l'on admet que les Treize tours marquaient les positions solaires sur l'horizon, alors leurs espacements indiquent probablement les divisions du calendrier solaire.

Depuis le point d'observation Ouest, le Soleil n'apparaissait que durant un ou deux jours dans l'espace entre deux tours successives. La régularité de l'espacement entre les tours suggère que le calendrier était divisé en intervalles réguliers. L'apparition du Soleil entre les tours centrales (de la troisième à la onzième) se faisait avec un intervalle d'une dizaine de jours. Ce laps de temps est plus grand entre les tours situées aux extrémités (première, deuxième,

douzième et treizième), car, lorsque le Soleil se rapproche du solstice, son parcours le long de l'horizon se fait plus lent. La situation est différente au point d'observation Est, d'où on ne voit pas la tour la plus méridionale. Les espaces restants correspondent à des intervalles de 11 ou 12 jours entre les couchers de soleil.

D'autres dates complémentaires à celles des solstices pourraient-elles avoir une importance particulière ? Si oui, les levers et couchers du Soleil à ces dates-là devraient correspondre à certains des espaces entre les tours. À ce sujet, il faut mentionner que le jour de l'équinoxe, le Soleil se lève dans l'espace central situé entre les tours 6 et 7. Si l'on considère la colline *Mucho Malo* comme une « tour » supplémentaire, la position de l'équinoxe devient totalement centrale. Depuis la direction opposée, le Soleil se couche, lors de l'équinoxe, juste à droite de ce même espace qui correspond au milieu de la rangée des 12 tours visibles de cet endroit.

Les solstices étaient clairement repérés

Les passages du Soleil au zénith (à la verticale de Chanquillo) et au nadir (à la verticale de son antipode, c'est-à-dire la verticale descendante) sont des dates à prendre en considération, car plusieurs indices suggèrent l'importance de ces dates solaires dans certaines cultures précolombiennes, en particulier dans les Andes. D'autres recherches semblent pointer l'importance du nadir à Cuzco (capitale inca), bien que cette hypothèse soit controversée. Quoi qu'il en soit, aucun des levers ou couchers de soleil sur les Treize tours ne coïncide avec ces dates. Seul le coucher du soleil le jour de son passage au zénith se produit non loin d'un espace entre deux tours...

Ainsi, la position de la colline aux Treize tours depuis les points d'observation Est et Ouest suggère qu'un observatoire relevant à l'établissement d'un calendrier solaire se trouvait à Chanquillo. Les solstices étaient clairement marqués, ainsi sans doute que les équinoxes. L'espace entre les tours semble indiquer l'importance des cycles de dix jours.

Un autre aspect du site de Chanquillo doit être noté : son alignement le long d'un axe de quelque 3,2 kilomètres de long orienté dans la direction Sud-Est. Cet axe traverse successivement l'horizon, la colline

ture entourant le point d'observation Ouest, la tour la plus orientale, la place centrale du complexe précédant le grand espace cérémoniel, pour se terminer au bout de ce dernier sur une petite plate-forme construite à son extrémité Est (voir l'encadré page 82). Or il coïncide à peu près avec l'axe reliant le soleil levant du solstice d'hiver au soleil couchant du solstice d'été...

L'existence d'un lien entre l'architecture sacrée d'une culture et sa perception du monde est connue. L'orientation de ses bâtiments sacrés peut par exemple indiquer les événements astronomiques notables; leur dessin peut suggérer à quelle date particulière on a cherché à investir un lieu de quelque «pouvoir sacré». Pour autant, les orientations et les formes données aux sites sacrés d'une culture ne peuvent être établies qu'à partir de ses catégories et de sa cosmologie, dont, le plus souvent, on ne dispose pas... Quel que soit l'intérêt de l'interprétation astronomique d'un alignement de bâtiments ou de l'orientation de l'un d'eux, le risque est grand qu'elle soit fautive, ne serait-ce que parce que les alignements astronomiques sont légion!

Il semble plus fiable en revanche de supposer des liens entre l'observation du mouvement solaire et l'ordonnement des activités saisonnières, telles que les fêtes religieuses ou les travaux agricoles, les plus importants. La configuration spatiale de Chanquillo est à cet égard tout à fait claire.

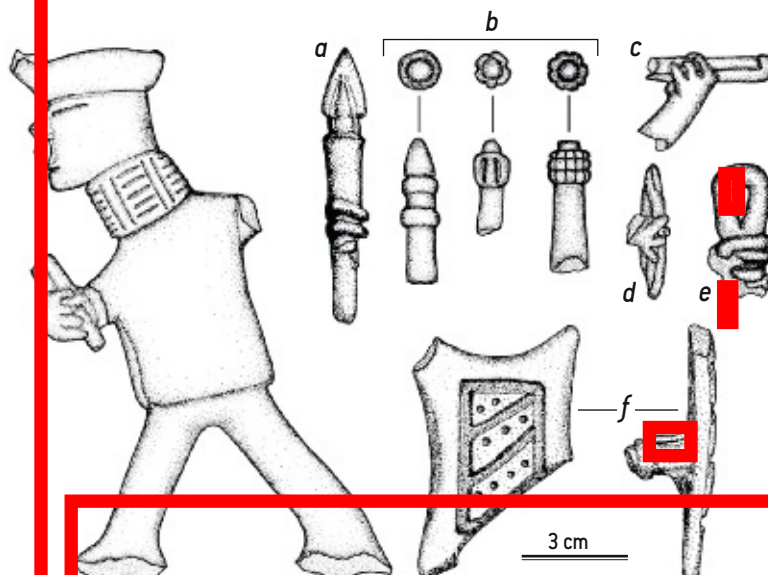
Tout d'abord, le site présente deux points d'observation et aucune ambiguïté n'existe au moins pour celui situé à l'Ouest, puisqu'il est matérialisé par une structure prouvant sa fonction. Ensuite, la colline des Treize tours couvre précisément la course du soleil entre son lever et son coucher, et se voit des deux points d'observation. Cela fixe les choses, et nous évite de faire jouer un rôle sans véritable raison à tel ou tel objet astronomique parmi les nombreux visibles sur la sphère céleste. D'une importance majeure dans de nombreuses cultures, les levers et couchers du soleil aux solstices sont en outre clairement marqués par la disposition des tours, qui semblent être les lointains ancêtres des tours d'observation solaire que l'on rencontrera plus tard chez les Incas.

Que pouvons-nous en conclure sur les gens qui ont construit Chanquillo? Tout indique que sur les places et dans les édifices qui jouxent les Treize tours, des foules participaient à des rituels et à des

banquets liés à l'observation et à l'interprétation des mouvements solaires. L'accès aux points d'observation semble en revanche avoir été restreint à une certaine «élite», qui maîtrisait non seulement le temps, mais aussi une idéologie afférente et les rituels qui s'y rattachent. Ces prêtres organisaient vraisemblablement de grandes réunions à Chanquillo.

Le culte solaire, instrument de pouvoir

Pareille ambiance suggère qu'une classe sociale centralisait le pouvoir. Or les fouilles ont livré des figurines de guerriers en céramique équipés d'armes, de boucliers et d'autres formes de protection corporelle (voir les figures 3 et 4). Les figurines portaient aussi des marques de statut: coiffures et tutus élaborés, colliers, ornements pectoraux ou nasaux, etc., qui décoraient et protégeaient. Ces «grades» évoquent le rôle social éminent de chefs de guerre. Le pouvoir était-il centralisé entre leurs mains? En tout cas, nous pensons qu'à Chanquillo, comme 2000 ans plus tard chez les Incas, un culte solaire et une cosmologie servaient à légitimer l'autorité d'une élite. Il est donc probable que le Treize tours aient servi à établir la sacralité du calendrier solaire utilisé par la culture de Chanquillo, et tout particulièrement par son élite pour manifester et entretenir sa domination.



4. CES FRAGMENTS DE POTERIE indiquent le genre d'armements qu'utilisaient les guerriers de la culture de Chanquillo. Il s'agissait notamment de lances (a), de casse-tête (b), de propulseurs de sagas (c), de handles (d), de fragments (e) et de boucliers (f).

✓ BIBLIOGRAPHIE

- I. Ghezzi et C. Buehler, *Chanquillo: A 2300-year-old solar observatory in coastal Peru*, *Science*, vol. 315, pp. 1239-1243, 2007.
- I. Ghezzi, *Religious warfare at Chanquillo*, *Andean Archaeology III*, pp. 67-84, W. Isbell et H. Silverman (dir.), Springer, 2006.
- J. R. Topic et T. L. Topic, *Hacia una comprensión conceptual de la guerra andina*, *Arqueología, antropología e historia en los Andes: Homenaje a María Rostworowski*, pp. 562-590.
- R. Varón Galdames, *El Templo de la Luna*, [dir.], *Historia Andina*, vol. 21, Instituto de Estudios Peruanos, Lima, 1992.
- R. T. Zuidema, *El sistema de ceques del Cuzco: La organización social de la capital de los incas*, PUCP, 2ª edición, Lima, 1995.
- B. S. Bauer et D. S. P. Dearborn, *Astronomy and empire in the ancient Andes: The cultural origins of Inca sky watching*, University of Texas Press, 1995.
- www.idarq.org/chankillo.htm

La sélection de livres

■ POUR LA SCIENCE

Ce mois-ci *Pour la Science* vous propose de découvrir les livres scientifiques les plus plébiscités par nos lecteurs. N'attendez plus pour composer vous aussi votre bibliothèque scientifique idéale !

En partenariat
avec les éditeurs



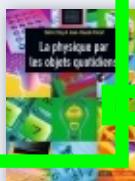
Tous ces livres sont
également disponibles
en librairie.

La physique par les objets quotidiens

Jean-Rayet et Jean-Claude Poizat

Largement illustré et à la portée de tous, ce livre détaille la physique à l'œuvre dans une quinzaine d'objets comme le café-rom, le tour à micro-ondes, le GPS, l'écran LCD, etc.

Éditions Belin/Pour la Science 2007
160 pages – 24,25 euros – ISBN 978-2-7011-4552-5



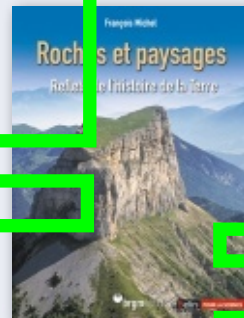
Réf. 004552

Roches et paysages Reflets de l'histoire de la Terre

François Michel

En partant d'exemples concrets, l'auteur explique avec un vocabulaire simple la formation des roches et des paysages ainsi que les grands événements tectoniques qui affectent la Terre et la remodelent. Un livre abondamment illustré de cartes géologiques, de schémas explicatifs et de plus de 400 photos.

Éditions Belin/Pour la Science 2005
256 pages – 21,85 euros – ISBN 978-2-7011-4081-0



Réf. 004031

La Terre avant les dinosaures

Sébastien Steyer et Alain Bénéteau

Retrouvez l'histoire des premiers vertébrés à quatre pattes, avec plus de 100 reconstitutions pour beaucoup inédites, ainsi que de nombreuses photos de fossiles. Un livre événement pour tous les passionnés des mondes perdus !

Éditions Belin/Pour la Science 2009
208 pages – 25,90 euros – ISBN 978-2-7011-4206-7



Réf. 004206

Mathématiques pour le plaisir

Un inventaire de curiosités

Jean-Paul Delahaye

Les mathématiques ne se réduisent pas – heureusement – à ce qu'on nous en apprend à l'école. Partout présentes, elles sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique. Dans cet ouvrage, découvrez pourquoi les mathématiques sont faciles et comment s'y adonner est un plaisir.

Éditions Belin/Pour la Science 2010
208 pages – 25,40 euros – ISBN 978-2-8424-5104-2



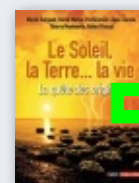
Réf. 075104

Le Soleil, la Terre... la vie

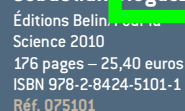
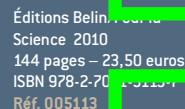
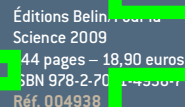
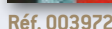
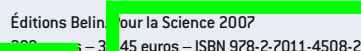
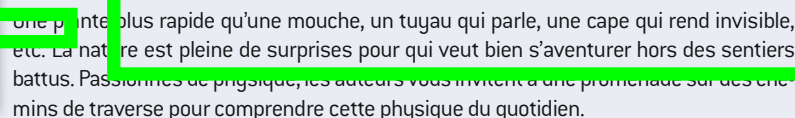
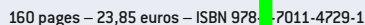
M. Gargaud, H. Martin, P. Lopez-Garcia, T. Montmerle et R. Pascal

Comment le Soleil puis la Terre sont-ils nés ? Quand les premiers continents se sont-ils formés ? Quand et comment la vie a-t-elle émergé ? Ce livre apporte des éléments de réponses grâce aux regards croisés et inédits d'un biologiste, de deux astrophysiciens, d'un chimiste et d'un géologue.

Éditions Belin/Pour la Science 2009
304 pages – 27,40 euros – ISBN 978-2-7011-4799-4



Réf. 004799



ou en re **voyant le bon de commande ci-dessous.**

POUR LA

à retourner accompagné de votre règlement à: Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • Tél.: 0 808 655 255 • e-mail : pourlascience@daudin.fr

Indiquez mes coordonnées :

nom: _____

Prénoms :

Address:

[illegible]

C.P.: [REDACTED]

Rece	Tól*
------	------

Page: 1	For: *
	*facultatif

E-mail : [REDACTED]@ [REDACTED]

Je choisis mon mode de règlement :

☐ par décret à l'ordre de *Pour la Science*☐ par carte bancaire[illegible]

Date d'expiration						(si applicable)
-------------------	--	--	--	--	--	-----------------

Grundprogramm

Signature obligatoire

Titre	Réf.	Prix
		€
		€
		€
		€
		€
Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger)		+ €
Total à régler		= €

HISTOIRE DES SCIENCES

Le mystérieux abaque de Gerbert d'Aurillac

Au X^e siècle, un jeune moine français inventa un abaque qui, pour la première fois, permettait d'effectuer des divisions. Alors qu'en Occident, on énumérait en chiffres romains, il utilisa une numérotation très proche des chiffres arabes.

Alain SCHARLIG

Calculer au X^e siècle n'était pas une mince affaire. Les nombres étant notés en chiffres romains, il était impossible de poser une opération par écrit. Essayez d'additionner DCCCLXXV et CCCLXXVII (qui s'écrivaient d'ailleurs ccclxxvj et cclclxxxvij, en cursives liées, voir la figure 2, partie haute) ! Aussi employait-on une représentation physique des nombres sous forme de jetons identiques disposés sur des lignes parallèles tracées sur une table (voir la figure 4). Nommées abaque, ces lignes constituaient, avec les jetons, la machine à calculer de l'époque. On y lisait les résultats, qu'on écrivait ensuite, par exemple, sur une feuille de compte.

Effectuer une addition à l'aide d'un abaque était relativement aisé (de nos jours, un enfant de dix ans l'apprend facilement) ; la soustraction était plus délicate ; la multiplication demandait un grand nombre de manipulations ; et la division était tout simplement hors de portée.

Pape de l'an mil

C'est alors qu'un moine, Gerbert d'Aurillac, inventa un abaque révolutionnaire – bien plus complexe, certes, au maniement beaucoup plus lourd, mais qui permettait d'effectuer des divisions. Cette invention resta confinée à quelques monastères. Pourtant, elle aurait dû faire le bonheur des comptables. Surtout, Gerbert utilisait, pour la première fois en Occident, une notation qui s'imposa dans les siècles suivants : le système de numérotation bien pratique pour

les calculs : les chiffres arabes. Pourquoi Gerbert éprouva-t-il le besoin de construire un tel abaque ? Comment fonctionnait-il ? Quelle notation guida Gerbert ? Pourquoi ne poussa-t-il pas plus loin ses réflexions sur les chiffres arabes, jusqu'à présenter lui-même son système de numérotation qu'ils sous-

tendent ? Quelles sont les questions auxquelles nous allons essayer de répondre.

Gerbert d'Aurillac est surtout connu pour la fonction qu'il occupa de 999 à 1003, date de son décès : il fut le premier pape français, sous le nom de Sylvestre II. Suite au décès subit du pape Grégoire V, l'empereur du Saint Empire romain germanique dont il était le protégé, Othon III, l'avait fait nommer au poste suprême de l'Église catholique. Il était alors archevêque de Ravenne, en Italie, depuis un an, et avait tout juste 50 ans. Mais Gerbert était aussi un savant réputé en Europe pour ses connaissances en astronomie, et un enseignant novateur de cette discipline.

Né dans une famille modeste peu avant 950, il était entré comme oblat, c'est-à-dire comme enfant offert, au monastère Saint-Géraud, à Aurillac dans le Massif central, où il était devenu moine bénédictin. À l'instigation de son abbé, qui espérait sans doute le voir revenir instruit et capable de dispenser un enseignement supérieur, il avait retourné en Catalogne de 967 à 970 sous la protection du comte de Barcelone Borrell II, qui l'avait confié à Hatton, évêque de Vic, une commune voisine de Barcelone. Hatton était réputé très savant dans les quatre disciplines du *quadrivium*, la seconde partie de l'enseignement des « arts », qui comportait l'arithmétique, la géométrie, l'astronomie et la musique. Gerbert avait été suivi à Aurillac la première partie de l'enseignement, le *trivium*, qui comportait la grammaire, la rhétorique et la dialectique.



1. LA STATUE DE GERBERT à Aurillac, érigée dans les années 1850 en l'honneur du pape de l'an mil. La tiare papale à trois niveaux est un anachronisme : les papes ne l'ont portée qu'à partir du XIV^e siècle.

ij.tb.xij.β.iiij.α.

En 971, Gerbert, âgé d'une vingtaine d'années, avait accompagné à Rome, sans doute comme secrétaire, le comte Borrell II et Hatton, qui devaient y négocier auprès du pape l'avenir de l'Église catalane. Il y était resté à la demande d'Othon I^{er}, empereur du Saint empire romain germanique, et avec l'autorisation du pape. Il y avait acquis une réputation de savant, donnant même des leçons au futur Othon II, fils d'Othon I^{er} (et futur père d'Othon III qui, nous l'avons vu, devint le protecteur de Gerbert). De retour en France en 972, Gerbert s'était rendu à Reims, où il était devenu écolâtre à l'école cathédrale, c'est-à-dire professeur d'université avant la lettre. Il y enseignait *trivium* et *quadrivium*. Et dans ce dernier domaine, il donnait une forte prépondérance à l'astronomie, et au calcul.

Un écolâtre érudit

Il semble que Gerbert avait des connaissances en astronomie bien plus larges que quiconque en France à cette époque. Il savait construire des cadrans solaires et un nocturnabe (un instrument donnant l'heure la nuit en fonction du mouvement des étoiles de la Grande Ourse), et connaissait le mouvement des planètes autour de la Terre et la position des constellations. Il savait en outre rendre la discipline accessible à ses étudiants, notamment en recourant à des modèles qu'il inventait, telles une sphère céleste avec ses parallèles et ses pôles, ou une sphère armillaire, formée d'anneaux et de cercles, que Gerbert

Si pos	cel tis	ten nis	Ze nis	cal etis	qui nas	ar bas	ymis	Andras	lg-n
⓪	9	8	Λ	6	4	3	2	1	
⓪	9	8	Λ	6	4	3	2	1	
⓪	9	8	Λ	6	4	3	2	1	
⓪	9	8	Λ	6	4	3	2	1	
⓪	9	8	Λ	6	4	3	2	1	
⓪	9	8	Λ	6	4	3	2	1	
⓪	9	8	Λ	6	4	3	2	1	
⓪	9	8	Λ	6	4	3	2	1	
⓪	9	8	Λ	6	4	3	2	1	
⓪	9	8	Λ	6	4	3	2	1	

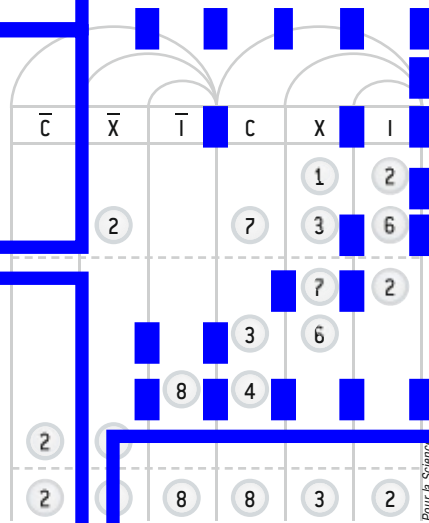
2. **COPIE D'UN DE L'ABAQUE DE GERBERT** tiré d'un manuscrit conservé à Erlangen, en Allemagne, daté du XIII^e siècle. Les adjonctions manuscrites n'ont rien à voir avec les jetons de l'abaque ; elles sont l'œuvre d'un « compilateur » qui voulait faire croire que l'abaque était une invention de Boèce, un auteur latin du VI^e siècle. On reconnaît en haut, de droite à gauche, les chiffres arabes de 1 à 9 en usage à l'époque en Europe. Le cercle avec un triangle n'est pas un zéro, mais un *sipos*, qui marque une position au cours d'un calcul. En dessous, on lit, en chiffres romains, les valeurs respectives des colonnes (unités I, dizaines X, centaines C, etc.) et aux lignes suivantes la moitié, le quart et le huitième de ces valeurs. Le texte au-dessus de ce document est extrait des comptes de T. l'abbé, en chiffres romains cursifs. On y lit 2 livres, 13 sous et 4 deniers en chiffres romains cursifs.

avait pour vue d'un mécanisme lui permettant de faire comprendre le mouvement des planètes.

C'est dans ce cadre que Gerbert enseigna les règles de multiplication et de division sur son abaque, afin, explique-t-il dans une lettre adressée à un ami vers 980, que ces opérations puissent être utilisées « en toute bonne foi dans la théorie et la pratique de la mesure du ciel et de la terre ».

Un abaque pour la division

L'abaque de Gerbert est constitué de colonnes verticales, que nous appellerions décimales, et que l'on dessine en nombre suffisant pour le calcul envisagé : par exemple quatre, si les nombres à traiter vont jusqu'aux milliers. Son originalité tient aux jetons que l'on utilise : ils sont non pas neutres, comme ceux de l'abaque classique, mais marqués chacun d'un chiffre. L'utilisateur dispose



3. UNE MULTIPLICATION SUR L'ABAQUE de Gerbert, tire d'un exemple de son élève Bernelin : $12 \times 20 = 36$. Effacez les colonnes et les cercles représentant les jetons et vous obtiendrez une opération très proche de la multiplication en numération de position telle que nous la réaliserions ; il n'y manque que le zéro de 20736, représenté par un vide dans la colonne des milliers.

de neuf tas de jetons, portant les chiffres de 1 à 9. Et ces chiffres sont arabes, ce qui représente la première apparition de cette notation en Europe. Mais attention : il ne s'agit pas tout à fait d'un marquage. Les chiffres arabes et le zéro n'ont été introduits que beaucoup plus tard – à la fin du XII^e siècle – et, grâce à eux, la numération de position que nous pratiquons encore.

Cette numération est dite de position, car la position de chaque chiffre dans le nombre forme sur son statut : dans 389, par exemple, on lit le 8 comme une quantité de dizaines, parce qu'il est dans la position des dizaines. Or cette notation n'a été possible qu'avec l'apparition des chiffres arabes et, surtout, du zéro (qui permet d'écrire que dans 389, il n'y a pas de dizaines). Alors seulement on peut effectuer des calculs par écrit, en alignant par exemple les nombres d'une addition sur leurs chiffres des unités.

Il ne nous est pas parvenu de description, par Gerbert, de l'utilisation de son abaque.

Une division sur l'abaque de Gerbert

Sur l'abaque de Gerbert, la division se fait en plusieurs étapes. En voici un exemple simple adapté du *Livre de la division* de Bernelin : la division de 888 par 5. Les jetons qui jouent un rôle à chaque étape sont mis en évidence.

En premier lieu, on pose le problème (a) : on écrit le diviseur, puis le dividende deux fois, d'abord comme témoin (on ne le touchera plus), et en dessous pour le diminuer à mesure qu'on divise et savoir ce qui reste à diviser. Puis on répond à la question « en

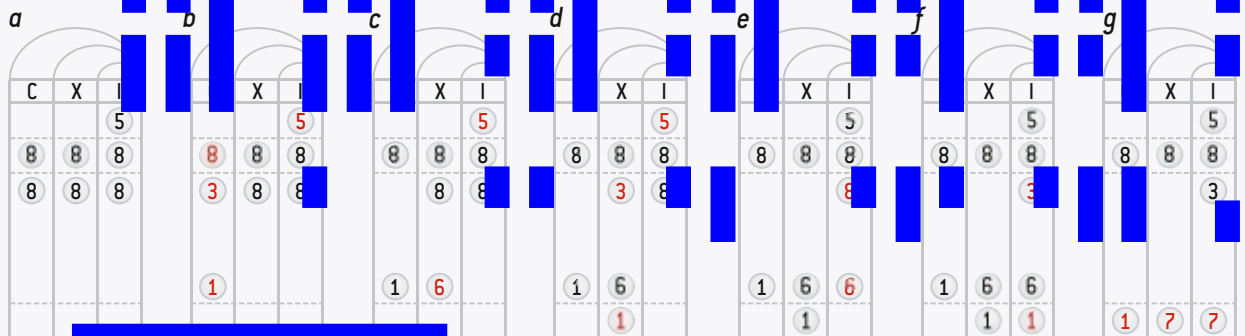
8 combien de fois 5 ? » pour le 8 de la colonne C des centaines (b). La réponse, 1, est placée au bas de la colonne des centaines, et on soustrait 5 du second dividende : il reste 3. La question suivante est plus subtile (c) : « En 3 de la colonne C, combien de fois 5 pour le 3 de la colonne X ? » La réponse, 0, est posée sur la colonne X des dizaines, et on enlève le jeton 3, ce qui donne 8.

Cette complication résulte de l'absence du zéro et de l'ignorance de la numération de position.

pouvant poser la question : « En 8 de la colonne X, combien de fois 5 ? » La réponse, 1, est inscrite au bas de la colonne X, et on soustrait 5 de ce 8 : il reste 3. On recommence alors le même calcul qu'en (b), décalé d'une colonne vers la droite (e) : on 3 le

On recommence alors le même calcul qu'en (b), décalé d'une colonne vers la droite (e) : on 3 le

colonnes des dizaines (f). La réponse, 1, est posée en bas de la colonne des dizaines, et le jeton 3 est retiré, car il n'y a plus de reste. Enfin, le même calcul qu'en (d) est effectué, décalé d'une colonne vers la droite (f). La réponse, 7, est placée au bas de la colonne des unités, et le jeton 3 est remplacé par le jeton 8 de la colonne des unités. Les quotients partiels, en bas de la division, sont donc : 177, le quotient de la division (g). Le 3 est, quant à lui, le reste de la division.

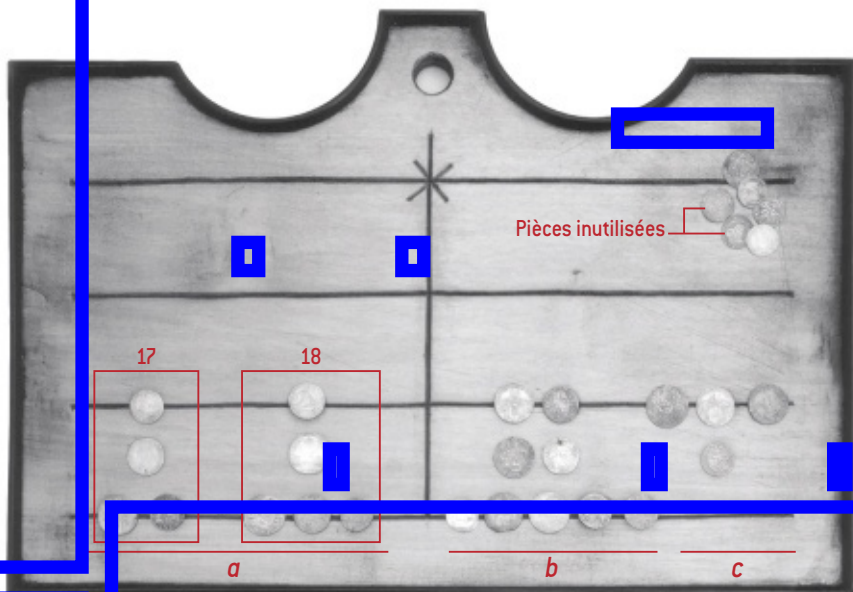


On dispose heureusement du texte de Bernelin, un élève de Gerbert qui a rapporté sa méthode. Lors que son maître était pape, entre 999 et 1003. Bernelin ne donne qu'une description textuelle de ses divisions, sans aucun dessin. Son texte ressemble ainsi à une suite d'instructions assez abscones : ne pouvant utiliser le zéro, ni se référer à la numération de position – qu'il connaissait pourtant peut-être, on y reviendra –, Gerbert avait été obligé d'énoncer toute une série de règles, définissant la colonne dans laquelle on place tel jeton en cours de calcul en fonction des colonnes où l'on a lu tel chiffre du dividende et tel autre du diviseur. Néanmoins, on comprend les étapes de la division en se reportant à l'opération telle que nous la pratiquons aujourd'hui (voir la figure 3 et l'encadré, page ci-contre).

Un bénéfice de son séjour en Catalogne ?

Un grand mystère entoure le calculateur Gerbert : où a-t-il puisé les idées qui l'ont conduit à son abaque ? Celui-ci n'existait pas chez les Arabes de son temps, et c'est donc une invention personnelle. Mais il présente de telles ressemblances avec notre numération de position, alors déjà connue des Arabes, qu'on peut faire une hypothèse raisonnable. Gerbert en aurait pris connaissance au cours de son séjour en Catalogne, quand il avait une vingtaine d'années. À cette époque, la Catalogne, qui ne portait pas encore son nom, était la partie orientale de la Marche d'Espagne, une bande de terres longeant les Pyrénées que Charlemagne avait conquises aux Arabes à la fin du VIII^e siècle. Le reste de l'Espagne était dominé par les Arabes. Plusieurs historiens pensent que lors de son séjour dans la Marche, Gerbert a été en contact avec la science arabe, sans doute par l'intermédiaire du monastère de Santa Maria à Ripoll, à 40 kilomètres au Nord de Vich, où des moines recopiaient des traductions latines d'ouvrages arabes sur l'astronomie, la géométrie et l'arithmétique.

Mais pourquoi, alors, Gerbert n'aurait-il pas préconisé tout simplement le calcul écrit, que cette numération permettait ? C'est un autre mystère, et une nouvelle



4. SUR L'ABAQUE CLASSIQUE (XV^e siècle), les lignes correspondent, de bas en haut, aux unités, dizaines, centaines et milliers, et les positions intermédiaires aux valeurs 5, 50 et 500. La hauteur à laquelle un jeton est posé détermine la « valeur » qu'il prend momentanément. Les jetons disposés ici représentent les trois étapes d'une addition. Les deux nombres à additionner, 17 et 18 (a), sont rapprochés pour former l'addition (b), puis une réduction du nombre de jetons est effectuée (c) en remplaçant deux jetons intermédiaires valant 5 par un jeton sur la ligne des dizaines, et cinq jetons unités par un jeton intermédiaire entre la ligne des unités et celle des dizaines. Le résultat obtenu est trois jetons sur la ligne des dizaines et un jeton intermédiaire valant 5, soit 35.

hypothèse : il était moine et ce qui venait des Arabes était suspect. Il a peut-être craint d'être accusé de sorcellerie ; il aurait alors inventé son abaque comme un moyen terme, entre l'abaque à lignes lié aux chiffres romains et la science arabe qui connaissait la numération de position et le zéro. La question reste entière...

Supplanté par le calcul arabe

L'avènement de l'abaque de Gerbert a été très modeste, pour une raison que le moine ne pouvait pas prévoir. L'engin n'intéressait qu'une élite, les meilleurs calculateurs ; or cette même clientèle s'est jetée sur le nouveau calcul – rendu possible par la numération de position, elle-même fondée sur les chiffres arabes et le zéro – dès qu'il s'est répandu en Europe chrétienne, vers la fin du XII^e siècle. Les mêmes personnes ont considéré l'abaque de Gerbert comme trop compliqué par rapport à la division par effacement ou biffage qu'il était désormais facile de réaliser par écrit.

L'AUTEUR

Alain SCHÄRLIG est professeur honoraire de la Faculté des Hautes études commerciales de l'Université de Lausanne, en Suisse.

✓ BIBLIOGRAPHIE

- A. Schärli, *Le portrait de Gerbert d'Aurillac. Inventeur d'un abaque*, éd. de la Librairie de la Faculté des Hautes études commerciales de l'Université de Lausanne, 1991.
- A. Schärli, *De zéro à la virgule. Les chiffres arabes à la conquête de l'Europe 1143-1585*, PPU, 2010.
- A. Schärli, *Comptes avec des jetons. Tables à calculer et tables de compte du Moyen Âge à la Révolution*, PPU, 2002.
- B. Bakhouch (éd. et trad.), *Bernelin. Livre d'Abaque*, PPU, 2000.

LOGIQUE & CALCUL

Pour prouver, tous les moyens sont bons

Les activités mathématiques ne se réduisent pas à la logique formelle. Dessins, petits films, programmes observés, interactions physiques, etc., sont l'occasion de mener des démonstrations aussi rigoureuses que l'écriture minutieuse des preuves formelles.

Jean-Paul DELAHAYE

L'évidence paraluse la démonstration
Pierre Renard (1889-1960)

Qu'est-ce que faire des mathématiques ? Depuis Euclide, on pense que les mathématiques commencent avec les démonstrations. C'est certainement vrai, mais est-on sûr de savoir ce qu'est une démonstration ?

L'évolution des technologies ouvre la voie à de nombreuses pistes nouvelles bousculant les idées trop assurées des logiciens et des philosophes qui, séduits par le symbolisme, ont cru résoudre définitivement le problème. Pour le mathématicien français René Thom (1923-2002) : « Est rigoureuse toute démonstration, qui,

chez tout lecteur suffisamment instruit et préparé, suscite un état d'évidence qui entraîne l'adhésion. » Cette conception ouverte, sans doute partagée par de nombreux mathématiciens, nous servira de repère et de guide.

Reprenons d'abord la façon dont les logiciens modernes envisagent la notion de preuve. Leur méthode, qualifiée de formaliste, procède en plusieurs étapes :

– On fixe un langage parfaitement précis permettant d'écrire des formules nommées énoncés.

– On choisit certains énoncés particuliers considérés comme acquis, les axiomes.

– On se donne des règles de manipulations symboliques permettant de passer d'énoncé en énoncé.

– On nomme alors démonstration (formelle) toute suite d'énoncés dont chacun est justifié soit parce qu'il s'agit d'un axiome, soit parce qu'il provient d'une manipulation autorisée à partir d'énoncés déjà obtenus.

Le tout constitue un système formel. On a cherché à concevoir pour l'arithmétique, la géométrie, la théorie des ensembles et tous les domaines mathématiques envisageables. Ceux de la théorie des ensembles englobent tous les autres et permettent, au moins en théorie, d'exprimer tout travail mathématique dans un langage unique avec une notation unique de démonstration (voir l'encadré pour un exemple simplifié de système formel).

Cette façon de procéder est intéressante quand on envisage d'utiliser les

1. Un petit système formel

Le système formel décrit ici produit des séquences correctes de parenthèses.

(1) Les formules sont des suites de symboles (et). (2) (est le seul axiome. (3) On a deux règles, I et II, de déduction d'un théorème à partir d'autres.

I : A et B étant démontrés, leur juxtaposition, AB, l'est aussi.

II : si A est démontré, alors A(B) est aussi (A).

Exemple : F1 : () ; c'est l'axiome du système.

F2 : (()) par la règle I appliquée à F1 prise deux fois.

F3 : ((())) par la règle II appliquée à F2.

F4 : (((()))) par la règle I appliquée à F3.

F5 : ((((())))) par la règle II appliquée à F4, etc.

Les théorèmes sont toutes les suites de parenthèses correctes.

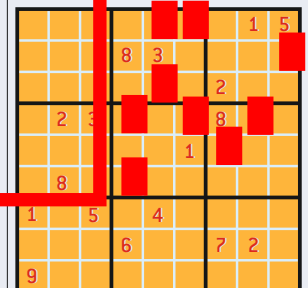
Les suites (() ou (()) () , par exemple, sont incorrectes et indémonstrables dans ce système formel.

2. Théorème fondamental du sudoku

Un sudoku comporte 17 données initiales et pourtant il n'en a qu'une seule solution. En janvier 2012, Gary McGuire a publié un article expliquant comment, à l'aide d'un long calcul qui s'est étendu sur toute l'année 2011, il a démontré (le résultat avait été pressenti, mais numériquement prouvé) qu'il n'existe pas de sudoku à 16 données initiales ayant une solution unique.

Sur la page <http://mapleta.maths.uwa.edu.au/~gordon/sudoku>, on trouvera d'autres sudokus corrects (qui n'ont qu'une solution) à 17 données initiales.

Sur la page <http://mapleta.maths.uwa.edu.au/~gordon/sudoku>, on trouvera d'autres sudokus corrects (qui n'ont qu'une solution) à 17 données initiales.



ordinateur pour qu'ils trouvent des démonstrations ou pour qu'ils vérifient des démonstrations trouvées par les mathématiciens. Pour cette vérification, il faut avoir pris soin de formaliser les preuves, ce qui se fait... avec l'aide d'ordinateurs (voir *Du rêve à la réalité de preuves* dans cette rubrique, avril 2011). Cependant, la formalisation des preuves est très contraignante et n'est vue que comme une possibilité ultime que l'on n'utilise qu'à rarement. La notion de preuve rigoureuse de Thom ne mentionne pas de formalisme symbolique et semble prête à accepter bien d'autres idées.

L'approche formelle est par ailleurs catastrophique dans l'enseignement où elle revient à apprendre aux élèves des recettes de calculs qu'ils ne comprendront pas toujours... ou presque jamais. Nicolas Bourbaki, pourtant considéré comme le prototype même du formaliste, a exprimé clairement que comprendre ne consiste pas à suivre ligne à ligne une démonstration formelle : « Tout mathématicien sait d'ailleurs qu'une démonstration n'est pas véritablement "comprise" tant qu'on s'est borné à vérifier pas à pas la correction des déductions qui y figurent, sans essayer de concevoir clairement les idées qui ont conduit à bâtir cette chaîne de déductions de préférence à toute autre. »

Si l'on souhaite vraiment saisir ce que sont les mathématiques, il faut, comme Thom, concevoir la démonstration d'une façon tolérante. C'est particulièrement important dans

l'enseignement, et c'est pourquoi il est légitime d'intéresser aux démonstrations entraînant l'adhésion de ceux à qui on les présente et n'entrant pas dans le cadre formaliste que nous venons de rappeler. Voici une liste de méthodes de démonstrations mathématiques hétérodoxes qu'il sera amusant de pratiquer, voire qu'il sera judicieux d'utiliser dans les classes pour susciter l'adhésion ou même... l'intérêt des élèves.

Preuve en calculant

Selon la conception formaliste, une multiplication posée n'est pas une preuve. Si on devait justifier dans le système formel de l'arithmétique élémentaire que $17 \times 19 = 323$, la démonstration occuperait plusieurs dizaines de lignes et n'apporterait rien. La traduction dans le système formel de l'arithmétique d'une opération posée :

$$\begin{array}{r} 17 \\ \times 19 \\ \hline 153 \\ 170 \\ \hline 323 \end{array}$$

est si fastidieuse et inutile qu'on ne la fait jamais. La vérification opérée en contrôlant chaque chiffre est facile et apporte une certitude. Simplement, un calcul posé doit, au sens de Thom, être considéré comme une démonstration.

Les méthodes de contrôle de telles démonstrations sont tellement simples, ne

demandant qu'un peu de soin et de patience (ou une machine), qu'un mathématicien dans un texte se contentera d'écrire $17 \times 19 = 323$, laissant aux lecteurs courageux l'exercice de calcul. Il écrira même sans donner de détail que 323 n'est pas un nombre premier (au lecteur de le vérifier $17 \times 19 = 323$), ou qu'il y a 25 nombres premiers inférieurs à 100 et 168 inférieurs à 1 000.

Les outils de calcul ayant progressé, cette pratique s'est généralisée. Dans un texte mathématique d'aujourd'hui, on écrira donc « la séquence 123 apparaît pour la première fois au 1924^e chiffre décimal de π » (c'est vrai !) sans rien expliquer de plus. L'idée est que la vérification d'un tel résultat, pourtant impossible à mener à la main, est évitée, car celui qui le souhaite entreprendra un petit travail de programmation dont l'issue le persuadera sans l'ombre d'un doute de la justesse de l'énoncé. Les preuves par le calcul pur vous conduisent, comme Thom l'écrit, dans un « état d'évidence qui entraîne l'adhésion », et cela même si le processus est long, fastidieux et s'appuie sur une multitude d'aides, dont celle d'une machine compliquée, produit d'une évolution technologique de plusieurs décennies aux nécessités des investissements se comptant en milliards d'euros.

Déjà évoquées plusieurs fois dans cette rubrique, les « preuves sans mots » sont

3. Des preuves sans mots

Un examen attentif de la figure suffit à se convaincre du théorème (une propriété géométrique ou algébrique) à démontrer :

A. Le théorème de Viviani : la somme des distances d'un point à l'intérieur d'un triangle équilatéral aux trois côtés du triangle est constante et égale à la hauteur du triangle.

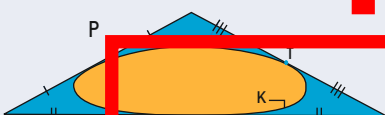
B. La somme des carrés des n premiers entiers est égale à $n(n+1)(2n+1)/6$ (on sait que la somme des n premiers entiers est $n(n+1)/2$).

The figure contains two parts, A and B. Part A illustrates Viviani's theorem using a triangle divided into three smaller triangles by lines from an interior point to the vertices. Part B illustrates the formula for the sum of squares of the first n integers using a grid of squares. The grid is composed of n columns, each with a height of n+1. The total number of squares is n(n+1). The grid is then partitioned into three regions: a top triangle of squares, a middle rectangle, and a bottom triangle, which together represent the sum of squares formula.

4. Pour la physique :

L'exemple suivant est tiré du livre de Mark Levi, *The Mathematical Mechanic*, Princeton University Press, 2009.

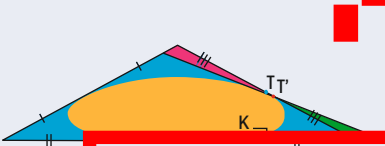
Théorème Soit P un polygone d'aire minimale ayant une frontière convexe F délimitée par une courbe fermée K . Pour chaque côté C de P , le point de tangence T de K avec C est situé au milieu de C .



Démonstration physique : On imagine un cylindre ayant pour section K et on l'entoure de planches qui peuvent bouger indépendamment les unes des autres (on imagine qu'elles s'interpénètrent sans résistance). On fait le vide entre les planches et le cylindre. Les planches tentent de minimiser le volume de vide. Quand elles s'immobilisent, la surface en bleu est minimale. À cet instant, puisque le système est en équilibre, les points de tangence coupent chaque côté au milieu, car les courbes de force dus à la pression constante se valent sur le point de contact. À deux dimensions, les forces uniformément réparties doivent s'équilibrer de part et d'autre du point de contact, qui est au milieu.

Esquisse d'une preuve avec des infinitésimaux, d'après Philippe Boulanger :

Ce raisonnement utilise le fait qu'une fonction ne varie pas au voisinage d'un extremum suffisamment « plat » (la dérivée première de la fonction est continue). L'aire comprise entre le triangle et la coupe K du cylindre est minimale. Faisons varier un tout petit peu un côté de manière qu'il reste tangent en T à la courbe K . Les petits triangles rouge et vert ainsi formés par les deux côtés ont la même aire, car l'aire bleue est minimale (l'aire gagnée est égale à l'aire perdue). Les deux triangles qui ont le même angle au sommet ont donc des longueurs de côtés de même longueur de part et d'autre de cet angle, et donc le point de contact est bien au milieu.

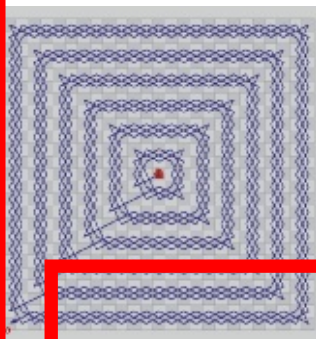


l'observation attentive de l'image conduit le « spectateur suffisamment instruit et préparé » dans « un état d'évidence » concernant l'énoncé. De telles démonstrations (voir l'encadré 3) sont, pour le mathématicien lui-même, des preuves parfaitement acceptables auxquelles rien ne manque.

Démontrer sans mots

Notons que les preuves sans mots, comme les preuves par le calcul pur, sont transformables en preuves formelles, mais le travail sera moins mécanique que pour le calcul pur. Le plus souvent, une telle traduction n'apporte pas grand-chose, et, au contraire, diminue « l'état d'évidence » que crée la preuve sans mots. Pour le mathématicien à l'esprit ouvert, une belle preuve sans mots est donc une bien meilleure preuve qu'une preuve formelle.

Notons que les preuves sans mots démontrent parfaitement des résultats concernant l'infini. C'est le cas de la preuve qu'un cavalier de jeu d'échecs peut parcourir toutes les cases d'un échiquier infini (*ci-dessous*).



Les preuves de topologie posent cependant un grave problème : en géométrie, Emmanuel Kant avait tort quand il estimait que les mathématiques sont fondées sur l'évidence intuitive des choses. Le théorème de Jordan illustre ce point : il énonce que « Toute courbe simple fermée C (ne se recoupant pas et revenant à son point de départ) divise le plan en deux zones telles qu'une courbe, qui relie un point de la première zone à un point de la seconde coupe nécessairement C ».

Suffit-il de faire un petit dessin pour démontrer le théorème de Jordan ? L'ad-

mettre est difficile, car aucune des preuves fondées sur les propriétés des nombres réels (indispensables pour définir convenablement ce que sont un plan et une courbe) n'est simple. On considère d'ailleurs qu'une preuve satisfaisante de ce théorème intuitivement évident n'a vraiment été formulée qu'en 1887 et qu'il a fallu encore un peu l'arranger en 1924 pour qu'on la juge complète. L'écriture totalement formelle d'une preuve du théorème de Jordan (dans un système permettant de parler de nombres réels) est considérée comme un exploit informatique et n'a été obtenue qu'en 2000 par Thomas Hales en utilisant le système logiciel HOL !

La raison de cette distorsion entre le petit dessin et la preuve détaillée jugée seule vraiment convenable est que le formaliste qui a sans doute raison cette fois, ne peut pas se contenter de dire qu'une courbe est un tracé qu'on dessine sans lever le crayon. Après avoir donné la définition précise d'une courbe utilisant la notion de fonction continue, il doit s'y référer... ce qui n'est pas facile. Lorsqu'il s'agira de topologie ou de continuité, même si les preuves sans mots par petits dessins sont possibles et assez persuasives, il sera utile pour aller plus loin (et obtenir des généralisations à des espaces à plus de deux dimensions) de s'intéresser aussi aux preuves ramenant la géométrie à l'analyse, et cela quel qu'en soit le coût.

Se convaincre par l'observation d'un film

Assez proches des preuves sans mots, il y a les preuves par l'observation d'un film d'animation. En regardant des figures animées soigneusement conçues, on se trouve persuadé d'une vérité mathématique (par exemple le théorème de Pythagore). Utilisant systématiquement ce type de preuves, une série de films remarquables créés par Tom Apostol et adaptés à la langue française par Éliane Cousquer est accessible gratuitement en <http://itunes.apple.com/itunes-u/mathematics-1/id420345770>

Toujours dans la même lignée, de petits programmes s'exécutent sur votre ordinateur

5. Une preuve mentale du théorème de Wilson

Théorème de Wilson : si p est premier, alors $(p-1)! \equiv -1 \pmod{p}$. Ce résultat était connu du mathématicien arabe Alhasen (965-1039) ; il doit son nom

On imagine un jeu de 52 cartes de couleur : Nord pour pique, Ouest pour trèfle, Est pour carreau, Sud pour cœur. On mélange les cartes et on en décrit une promenade aléatoire en prenant les cartes une à une et en les mettant à la suite l'une de l'autre. On se déplace : Nord que d'Est, Sud et autant d'Ouest que d'Est, le parcours ramène au point de départ.

Prenons maintenant un jeu de p cartes, portant un nombre premier. Soit l'angle $360^\circ/p$ (un p -ième d'un tour complet) qu'on dénombrera angle de base. On numérote les cartes par les entiers de 0 à $p-1$. À la carte i , on associe i fois l'angle de base. Comme précédemment quel que soit l'ordre des

ces p angles pris dans l'ordre : ils dessinent une étoile régulière à p côtés et donc leur somme est nulle dans un autre ordre, elle reste en sûr nulle.

On réfléchit maintenant aux $p!$ promenades aléatoires engendrées par ces différentes façons de départager les cartes. Sans importance, il n'y a que $(p-1)!$ promenades aléatoires différentes.

Certaines promenades sont peut-être invariantes par rotation, mais puisque p est premier, cela ne peut être que la rotation de l'angle de base. Les promenades invariantes par rotation de l'angle de base sont faciles à identifier : ce sont celles qui dessinent les étoiles régulières faites en reliant p points régulière-

la façon dont on la parcourt). Il y a donc en tout $(p-1)! - (p-1)$ promenades différentes asymétriques.

Toute rotation d'une promenade asymétrique par un multiple de l'angle de base donne une autre. Les promenades asymétriques se regroupent donc en paquets de p (dans un paquet, toutes les promenades s'obtiennent en faisant tourner l'une d'elles par un multiple de l'angle de base). Le nombre $(p-1)! - (p-1)$ est donc divisible par p , donc $(p-1)! \equiv -1 \pmod{p}$ aussi. CQFD.

La réciproque conduit à une caractérisation des nombres premiers. Elle se fait également aussi : si $p > 4$ est composé alors $(p-1)!$ est divisible par p .

à John Wilson (1741-1783) qui l'énonça en 1770 sans le démontrer, chose faite trois ans plus tard par Joseph Louis Lagrange.

en déduit ramène au point de départ. Pour le voir, on considère les p vecteurs unitaires associés à

Il y en a exactement $p-1$ (il y a deux fois moins d'étoiles, mais cha-

fait, puis p non carré, donc $(p-1)! + 1$ n'est pas. Pour $p = 4$, on a

teur et vous proposent des démonstrations animées parfaitement convaincantes (voir <http://clem.hnscd.edu/~talman/MathAnim.html> pour une collection de telles animations).

Des preuves mentales

À l'opposé des preuves sans mots, il y a les preuves sans dessins ni symbolisme mathématique, qu'on pourrait qualifier de mentales. Lors d'une promenade à pied avec un ami, vous la raconterez... et cela même en pleine nuit. Pour peu qu'il soit assez attentif, en vous écoutant, votre ami comprendra et se trouvera donc à la fin de votre exposé convaincu d'un résultat mathématique nouveau. Récemment, le mathématicien britannique Adam Goucher a proposé une preuve mentale et géométrique (ce n'est pas incompatible !) du théorème de Wilson. Ce théorème donne une caractérisation des nombres premiers comme nombres p qui divisent $(p-1)! + 1$ (voir la figure 5). Je vous recommande cette

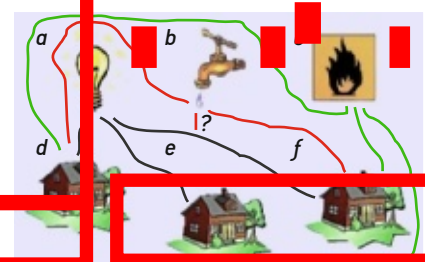
preuve pour votre prochaine excursion en montagne. Elle vous fera sentir, bien mieux que les preuves usuelles fondées sur des connaissances peu intuitives d'arithmétique modulaire, que le théorème est vrai : en un mot elle vous fera accéder à cet état de conviction profonde qui constitue la compréhension mathématique véritable. Du fait de leur nature verbale, les preuves mentales sont en général faciles à traduire en preuves formelles.

Preuve en bougeant son corps

Les mouvements et les actions qu'on effectue soi-même sont un bon moyen de se persuader d'une vérité. Cette implication du corps dans le processus de démonstration est parfois le moyen le plus efficace d'arriver à l'état de certitude intime à propos d'un énoncé mathématique.

L'exemple du problème des trois maisons de Henry Dudeney qui doivent avoir l'eau, le

gaz et l'électricité illustre cette situation (voir ci-dessous). Il lui correspond le théorème affirmant que le graphe $K_{3,3}$ (où trois points a , b et c rejoignent chacun trois autres points d , e et f) n'est pas planaire, c'est-à-dire ne peut pas être dessiné sur un plan sans que les traces des jonctions ne se coupent. Qui-conque essaye pendant dix minutes de résoudre le problème de Dudeney avec un papier, un crayon et une gomme, atteint cet état de certitude absolue que $K_{3,3}$ n'est pas planaire.



Le problème des trois maisons de Henry Dudeney : les tracés reliant les maisons aux puits coupent forcément au moins une fois.

Ces mouvements réalisés pour soi construisent une conviction privée, mais une démonstration doit être communicable. Ici, on ne peut donc pas considérer que la certitude acquise par manipulation vaut pour démonstration. Heureusement, l'énoncé que $K_{3,3}$ n'est pas planaire a des démonstrations au sens usuel, quoiqu'utilisant de façon plus ou moins directe le théorème de Jordan et donc délicates à formaliser.

Démonstrations de physiciens

Notre connaissance instinctive ou apprise de la physique nous conduit à être certain d'énoncés pourtant purement mathématiques. Ces preuves d'énoncés mathématiques par le raisonnement physique peuvent difficilement être considérées comme de vraies preuves mathématiques et on ne sait pas ce qu'en aurait dit Thom. Cependant, elles sont fascinantes et il ne fait pas de doute qu'elles conduisent dans un état de certitude parfois aussi fort que les preuves vraiment mathématiques. La

rubrique de février 2010 qui présentait un livre de Mark Levi consacré au sujet en donnait une série d'exemples (voir l'encadré 4 pour un autre). Ces preuves sont délicates à analyser pour le mathématicien, car la preuve s'appuie sur des lois ou des considérations physiques qui ne sont pas permises habituellement en mathématiques. D'ailleurs, si les lois physiques ne sont pas vraies (une loi physique n'est jamais démontrée définitivement), il se pourrait que ce qu'on en a déduit de purement mathématiques soit faux. L'analyse approfondie de ces preuves ferait peut-être découvrir qu'elles sont exprimables en contournant les hypothèses physiques qui y sont à l'œuvre. Le problème n'est pas très simple et il semble qu'il y ait là un beau sujet de recherche logique qui, à ma connaissance, n'a pas été traité.

La simple observation d'un programme qui affiche des images sur un écran constitue parfois une preuve entraînant une parfaite adhésion. Ce type de preuves est rarement mentionné par ceux qui réfléchissent à la nature des mathématiques

et des démonstrations. Pourtant, il existe des domaines où elles jouent un rôle central, totalement irremplaçable, et où personne n'a le moindre doute sur les énoncés mathématiques qu'il produit.

Considérons l'énoncé suivant : il existe une configuration du *Jeu de la vie* de Conway de dix cellules créant des configurations dont le nombre de cellules tend vers l'infini.

Observer le déroulement d'un programme

C'est un énoncé mathématique très simple. Il n'a été démontré qu'en 1997 par Paul Callahan, 10 ans après l'invention du jeu. En quoi consiste sa démonstration ? En la présentation d'une configuration de dix cellules (à trouver), suivie de l'observation de 1 000 générations successives du devenir de la configuration. Ces 1 000 générations ne peuvent pas se calculer à la main, car assez rapidement elles font intervenir un grand nombre de cellules. À partir de la génération 1 000, le calcul présente une régularité : une partie de la configuration se reproduit, tandis qu'une autre partie avance, laissant derrière elle des cellules vivantes de plus en plus nombreuses et formant un motif périodique.

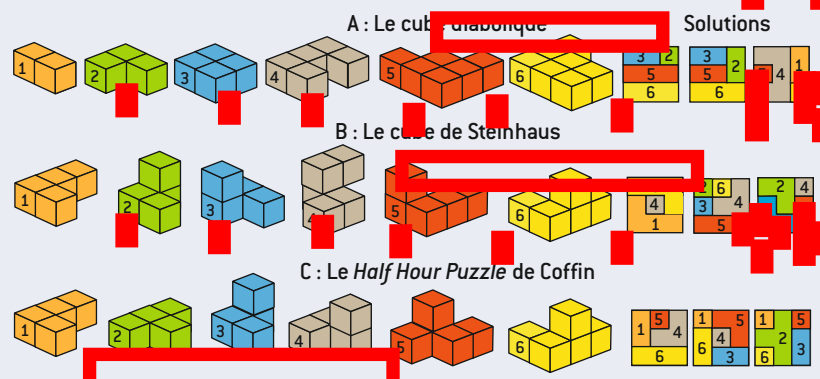
La conviction que cela se poursuit est totale. En effet, d'une part, le programme a été testé un grand nombre de fois et nul ne doute qu'il calcule comme il faut (on peut aussi refaire fonctionner la configuration initiale de dix cellules avec un autre programme) ; d'autre part, la régularité de ce qu'on observe ne laisse pas de doute sur l'idée que la croissance se poursuivra indéfiniment. C'est bien l'observation du programme en train de fonctionner en continu qui crée cet état d'évidence entraînant l'adhésion dont parlait Thom et qui caractérise les preuves rigoureuses.

L'étude du *Jeu de la vie* et de bien d'autres problèmes cellulaires conduit à pratiquer ce type de démonstrations et essentiellement celui-là. On y prouve des théorèmes dont certains sont si peu évidents qu'on ne les a découverts qu'après plusieurs décennies

6. Les démonstrations par manipulation

Si vous réussissez à ranger la boîte de cubes, vous en tirerez sans mal une preuve descriptive du théorème géométrique affirmant que ce rangement est possible. En revanche, si, après avoir essayé de le faire, vous constatez que c'est impossible et n'aurez pas le moindre doute. La conviction acquise « par manipulation » que la boîte ne peut pas être rangée sera malheureusement incommunicable et ne constituera donc pas une preuve mathématique acceptable.

Le cube de Steinhaus (A), inventé en 1930 et le *Half Hour Puzzle* de Coffin, inventé vers 1970 (C), se remonte après une demi-heure de réflexion... Les solutions droites représentent les trois vues du cube (de gauche, de droite et de dessus).



de recherche. Ce sont des preuves hétérodoxes certes, qu'on pourrait transformer en preuves formelles très longues (car le contexte est discret et se réduit à l'arithmétique) mais personne n'en ressent la moindre nécessité. Ce sont les preuves dont ce domaine mathématique a besoin et aucun autre type de preuves n'établira mieux le résultat qu'il existe une configuration de dix cellules qui croît indéfiniment.

Une autre démonstration par énumération (menée par ordinateur, bien sûr) a établi qu'il n'existe aucune configuration de neuf cellules ou moins qui croît indéfiniment : la configuration à dix cellules de P. Calahan est donc la plus petite possible ayant cette propriété.

Le résultat cité paraîtra un peu anecdotique, mais ce n'est pas toujours le cas. La meilleure preuve du théorème de John von Neumann qu'il existe des configurations auto-reproductrices fonctionnant sur un schéma génétique (voir l'article de cette rubrique de janvier 2012) est de cette nature. La conviction profonde que doit donner une démonstration peut dans ce cas soit provenir de la lecture attentive du texte de von Neumann (c'est un gros effort), soit provenir de l'observation du calcul réalisé par le programme qui fait fonctionner sa fameuse configuration, programme dont bien sûr on s'assurera qu'il fait ce qu'on attend et rien d'autre. Les preuves par observation du fonctionnement d'un programme pourraient bien jouer un rôle important dans l'avenir des mathématiques.

Confier le calcul à un ordinateur

Nous n'insisterons pas sur les preuves obtenues par l'usage d'un ordinateur qui réalise un calcul (qu'on n'observe pas directement comme précédemment). Depuis plusieurs dizaines d'années, leur usage s'étend lentement et on leur doit maintenant des théorèmes importants. Signalons un très bel exemple tout récent. En janvier de cette année, après plus de cinq ans de travail, le théorème fondamental du sudoku a été démontré : une grille de sudoku 9×9 doit comporter 17 chiffres préinscrits ou plus pour avoir une solution unique.

Le résultat m'a été signalé par son auteur Gary McGuire, de l'*University College* de Dublin, qui pour son énorme calcul, a été aidé de Baptian Tuguean et Gilles Civario. Précisons qu'il y a peu de temps, ce calcul était jugé infaisable et qu'il n'a pu être mené que parce qu'il a été préalablement simplifié par une étude mathématique utilisant certains outils combinatoires, dont le lemme de Burnside.

Les tentatives mathématiques directes (sans ordinateurs) pour traiter le problème réussissent à montrer assez facilement que certaines données sont nécessaires, mais ne vont pas plus loin pour l'instant. On est donc très loin du 17 obtenu avec l'ordinateur et qui apparaît totalement hors de portée du raisonnement non assisté par une machine. La preuve par ordinateur a exigé un calcul équivalent à plus de sept millions d'heures (environ 800 ans) d'un bon processeur d'ordinateur de bureau. L'examen du programme, des résultats mathématiques sur lesquels il se fonde, des contrôles assurant que tout se déroule bien et du résultat qu'il produit constituent un ensemble de données communicables qu'il faut considérer comme une preuve rigoureuse au sens de Thom.

La liste des démonstrations hétérodoxes contient d'autres catégories encore, que je cite brièvement sans donner d'exemple : à l'inverse de la conception formaliste, elles incitent à une vision libre et ouverte de l'activité mathématique.

— Les preuves sans transfert de connaissance. En dialoguant avec la personne qui détient la preuve, vous serez persuadé que l'affirmation mathématique est juste, mais vous n'apprenez rien de la preuve et vous restez donc incapable d'en convaincre quelqu'un d'autre (voir l'article de cette rubrique de janvier 2011).

— Les preuves probabilistes : même si la preuve aboutit, il reste une probabilité (que l'on tentera de rendre aussi faible que possible) pour que le résultat prouvé soit faux.

— Les preuves holographiques (ou PCP) : vérifier la preuve (avec un risque très faible de se tromper) n'exige qu'un petit morceau de la preuve.

L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

G. McGuire, There is no 6-clue Sudoku, 2012 : <http://www.math.ie/checker.html>

R. Nelson, Proof without words, The Mathematical Association of America, vol. II 1993, vol. II 2000, version française à paraître aux éditions Hermann, 2012.

J.-P. Delahaye, Persuader de son savoir sans le transmettre, Pour la Science n° 399, janvier 2011.

J.-P. Delahaye, Du rêve à la réalité des preuves, Pour la Science n° 402, avril 2011.

J.-P. Delahaye, Quand la physique démontre des théorèmes mathématiques, Pour la Science n° 388, février 2010.

C. Alsina et R. Nelson, Visualizing Basic Identities, The Mathematical Association of America, 2009.

M. Levi, The Mathematical Mechanic, Princeton University Press, 2009.

C. Alsina et R. Nelson, Math Made Visual, The Mathematical Association of America, 2006.

IDÉES DE PHYSIQUE

L'anneau bavard, *alias* chatter ring

Le chatter ring, l'« anneau qui bavarde », est un accessoire de jonglerie très populaire en Nouvelle-Zélande, à Hawaï et au Japon. Son principe s'apparente à celui d'un hula hoop à plusieurs anneaux.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Quasi inconnu en France, le *chatter ring* a connu son heure de gloire à la fin du siècle dernier (le XX^e...) en Nouvelle-Zélande, où 170 000 exemplaires ont été vendus en moins d'un an, et au Japon (500 000 exemplaires). Ce jeu difficile à maîtriser consiste en une tige métallique circulaire sur laquelle sont enfilés cinq petits anneaux, métalliques eux aussi.

Mis en rotation rapide, les cinq anneaux effectuent le long de la tige annulaire une sorte de mouvement de *hula hoop* descendant, en faisant tinter un son métallique. Cela se poursuit tant que l'utilisateur parvient à maintenir les anneaux « vivants » en faisant tourner le grand anneau sur lui-

même (voir la figure 1). Entre les mains de joueurs expérimentés, cet objet devient un accessoire de impressionnant. Et il offre au physicien un joli sujet de réflexion...

Et le jeu renaquit de ses cendres...

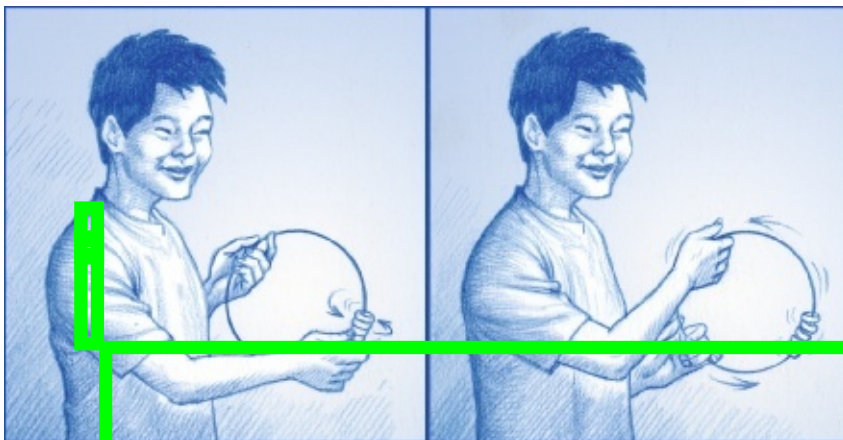
Le *chatter ring*, nommé aussi *jitter ring*, est constitué d'une tige d'acier de 6,4 millimètres de diamètre formant un cercle de 28 centimètres de diamètre, sur lequel sont enfilés cinq anneaux de trois centimètres de diamètre extérieur et de sept millimètres d'épaisseur. Le trou central de ces anneaux est deux fois plus large que la tige. Une fois lancés par un vigoureux

coup de pouce, les petits anneaux tournent très rapidement autour de la tige centrale, en descendant lentement.

Le principe du jeu est de faire tourner la tige pour maintenir les petits anneaux en rotation à hauteur constante. Une fois ce mouvement maîtrisé, on peut ensuite réaliser des figures, par exemple faire passer le grand anneau en position horizontale ou jongler sans que les petits anneaux ne cessent de tourner autour de la tige.

L'ancêtre du *chatter ring* est le *gyro ring*, jeu pour enfants né peut-être au début du XX^e siècle. Un brevet de 1906 de l'Américain William Van Horn porte sur un système à un seul anneau. Le *gyro ring* était composé d'une tige métallique circulaire traversant cinq anneaux de plastique. Dans les années 1980, le physicien américain Jearl Walker a mentionné une variante, le *fiddlestick*, dans *Le carnaval de la physique*, son ouvrage bien connu des amateurs de physique amusante. Dans cette version, les petits anneaux descendent le long d'une tige rectiligne verticale.

Le *gyro ring* ou le *fiddlestick* seraient restés dans l'ombre si, dans les années 1990, un incendie n'avait pas détruit la maison d'un jeune Néo-Zélandais qui avait en sa possession un exemplaire de *gyro ring* (du moins est-ce ce qu'on raconte). En cherchant dans les débris de sa chambre calcinée, le jeune homme retrouve son jeu avec les petits anneaux déformés de leur plastique, qui a brûlé. Il s'aperçoit vite que l'objet rescapé est bien plus rapide et qu'il produit un ronronnement métallique marqué (c'est ce



Dessins de Bruno Vacaro

1. CINQ PETITS ANNEAUX MÉTALLIQUES mis en rotation rapide autour d'une tige circulaire : ce jeu simple, le *chatter ring* ou *jitter ring*, consiste à maintenir le plus longtemps possible la rotation des anneaux sur la tige, en faisant tourner le grand cercle de façon à garder les petits anneaux à la même hauteur.

qui lui vaut le nom de *chatter ring* (anneau qui bavarde). Avec l'aide de son père, il fabrique alors de nouveaux jeux en remplaçant les anneaux par des écrous.

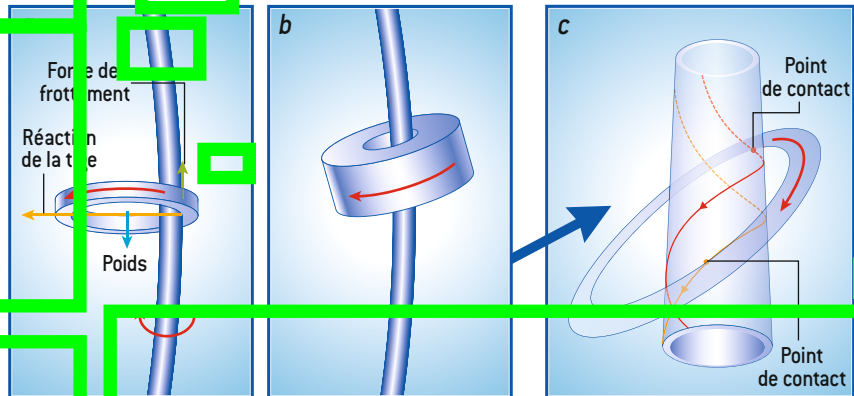
En voyant des enfants y jouer, Murray Potts, responsable d'une ferme de production de kiwis, perçoit tout le potentiel du dispositif. Il l'améliore et convainc Warehouse, le plus gros vendeur néo-zélandais de jouets, qui en écoule 140 000 exemplaires dans ce pays entre avril et octobre 1996. Le succès du jeu est tel que des écoles sont obligées de l'interdire...

Descente hélicoïdale

Comment expliquer le comportement des petits anneaux ? En première approximation, leur mouvement est semblable à celui d'un *hula hoop*. Dans un *hula hoop*, l'anneau est horizontal, c'est-à-dire perpendiculaire à l'axe vertical formé par le corps du joueur, et roule sans glisser sur l'axe central. Lorsque la rotation est assez rapide, le cerceau prend une position horizontale sous l'effet de la force centrifuge. C'est en remuant son bassin que le joueur entretient la rotation du cerceau. Toujours à cause de la force centrifuge, l'anneau est fermement plaqué contre l'axe vertical du corps. Ce contact crée une force de frottement qui empêche l'anneau de glisser vers le bas pendant qu'il roule sur le corps.

De la même façon, dans le *chatter ring*, la rotation permet aux petits anneaux de rester plaqués contre la tige centrale. Ainsi, ils ne glissent pas. Toutefois, aucun mouvement de la tige analogue à celui du corps dans le *hula hoop* ne vient entretenir leur rotation. D'où les anneaux tirent-ils donc l'énergie pour continuer de tourner ? Réponse : du champ de pesanteur. Voyons comment.

Les anneaux du *chatter ring* ne sont pas perpendiculaires à la tige, mais inclinés. Cette inclinaison, ajoutée à l'épaisseur de l'anneau, fait que le contact entre un anneau et la tige a lieu en deux points et non plus un seul (voir la figure 2). Il s'ensuit qu'en roulant sur la tige, l'anneau ne se déplace pas sur un cercle restant dans un même plan, mais selon une hélice : à la rotation s'ajoute un mouvement de translation (sans



2. LE PRINCIPE DU CHATTER RING s'apparente à celui du *hula hoop*. Dans ce dernier (a), l'anneau est maintenu en rotation à un niveau constant grâce à une agitation appropriée de l'axe : cette agitation fait tourner l'anneau, et la réaction de la tige, opposée à la force centrifuge, crée une force de frottement suffisante pour que l'anneau ne glisse pas vers le bas. Dans le *chatter ring* (b et c), l'anneau est incliné, avec deux points de contact avec l'axe. Quand l'anneau tourne sans glisser, il descend le long de la tige, les deux points de contact décrivant une hélice. L'énergie cinétique gagnée dans le champ de pesanteur sert à entretenir la rotation.

glisser en) le long de la tige. Du couplage de ces mouvements résulte un transfert d'énergie. La perte d'énergie du mouvement de rotation due au frottement de roulement entre l'anneau et la tige, est compensée par l'énergie cinétique gagnée lors de la descente dans le champ de pesanteur. Et le joueur compense en continu cette descente en faisant tourner la tige centrale dans un plan vertical, ce qui a pour effet de maintenir les anneaux à un même niveau.

En expérimentant, on voit que les anneaux adoptent l'inclinaison maximale compatible avec leur géométrie. On comprend aussi que l'inclinaison est d'autant plus forte que le diamètre est grand, et il en est de même pour le pas de l'hélice décrite le long de la tige. On en déduit que, pour une même vitesse de rotation, la descente le long de la tige est d'autant plus rapide que le diamètre intérieur de l'anneau est grand.

Conséquence ? Si l'anneau est trop large, une rotation suffisamment rapide pour que la force centrifuge plaque l'anneau sur la tige entraînera une descente trop brutale, que le joueur serait incapable de compenser. Ainsi, si son diamètre est trop grand, l'anneau se met à glisser. En revanche, si l'anneau est trop petit, il est quasi horizontal ; la descente

LES AUTEURS



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

BIBLIOGRAPHIE

H. R. Crane, *Chattering, the chattering and the hula hoop*, *The Physics Teacher*, vol. 30(5), pp. 306-309, 1992.

Retrouvez les articles de M. Courtuy et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr



3. CEUX QUI MAÎTRISENT l'« anneau bavard » peuvent pousser assez loin les jeux d'adresse et les figures de jonglerie.

et, donc, la conversion d'énergie potentielle de gravitation en énergie cinétique ne sont alors pas assez rapides pour compenser les pertes dues au frottement, et la rotation cesse. La fourchette pour laquelle on a le mouvement attendu se situe pour un diamètre intérieur des petits anneaux compris entre 1,2 et 2,3 fois le diamètre de la tige.

La présence de plusieurs anneaux rend le jeu encore plus intéressante. Des photographies au flash ou l'utilisation de caméras rapides montrent tout d'abord que la rotation des divers anneaux est synchronisée et que ceux-ci descendent à la même vitesse, alors même qu'ils ne sont pas en contact.

Comment cela est-il possible ? La rotation des anneaux entraîne une vibration de la tige qui couple le mouvement des divers

anneaux. Ainsi, non seulement ces anneaux se mettent à tourner à la même fréquence, mais en plus ils deviennent en phase, c'est-à-dire que tous les anneaux tournant dans le même sens sont, à chaque instant, inclinés dans la même direction.

Cependant, on ne comprend pas encore tout du *chatter ring*. Les anneaux peuvent tourner dans des sens différents (le choix dépend de la façon dont on les lance). Dans ce cas les anneaux restent synchronisés, mais on constate que la distance entre deux anneaux successifs tournant en sens opposés est sensiblement supérieure à celle qui sépare deux anneaux tournant dans le même sens. Pourquoi ? Qu'est-ce

qui détermine la distance entre deux anneaux successifs ? Expérimentateurs, à vos anneaux !

universcience présente

les conférences

à la Cité des sciences et de l'industrie

entrée libre

Le cosmos vu par les mathématiques [LES MERCREDIS À 18 H 30]

Les mathématiques mettent à mal les apparences placides de la voûte céleste et dérangent notre vision du cosmos. Que nous révèlent les théorèmes et les équations ? Quelles surprises nous réservent-ils ?

21 MARS Le Système solaire est-il chaotique ?
→ François Béguin, maître de conférences au département de mathématiques d'Orsay à l'université Paris-Sud-XI et chercheur au département de mathématiques et applications à l'École normale supérieure (ENS), Paris.

28 MARS La galaxie, agitée et en quête de relaxation
→ Cédric Villani, professeur de l'Université de Lyon, directeur de l'Institut Henri-Poincaré, CNRS/UPMC, Paris, et lauréat de la médaille Fields 2010.

4 AVRIL L'Univers est-il courbe ?
→ Jérémie Szeftel, chercheur au département de mathématiques et applications à l'École normale supérieure (ENS), Paris.

Avec le soutien de

SCIENCE FUTURA-SCIENCES encyclo SCIENCES AVENIR culture

programme complet sur www.universcience.fr

SCIENCE & GASTRONOMIE

Le fractionnement des produits

Cuisiner « note à note » à partir de composés purs est compliqué. Un compromis est d'utiliser des mélanges préparés par avance.

Hervé This

Dans la cuisine moléculaire, il ne s'agit pas de cuisiner avec des molécules : qui prétendrait faire autrement ? Non, le but est de tirer profit de « nouveaux » outils, ingrédients, méthodes – par exemple le siphon, l'évaporateur rotatif, la sonde à ultrasons, l'azote liquide, les agar-agar, carraghénanes, etc. L'idée de la cuisine note à note est différente : il faut partir de composés (purs si possible) pour construire les mets.

La difficulté de cette cuisine est analogue à celle qu'ont rencontrée les musiciens quand sont apparus les premiers synthétiseurs : étant donné la possibilité de mêler des sons de fréquence pure, comment faire de la musique ? Il semblait fastidieux d'avoir à décider, pour chaque fréquence audible, de l'intensité du son, en vue de faire non plus des notes, mais des mélanges d'ondes sonores ! Aussi les fabricants de synthétiseurs ont introduit des « enveloppes », afin de produire des timbres préformés, avec quelques possibilités de réglage, qui restreignent certes les possibilités théoriquement infinies, mais qui permettent au musicien... de faire de la musique.

Et s'il en était de même pour la cuisine note à note ? Puisque la construction d'un plat à partir de composés purs est compliquée, ne pourrions-nous pas, plutôt, partir de mélanges préparés par avance et différents des tissus végétaux ou animaux ? Une proposition, pour préparer de tels mélanges, est le fractionnement des produits végétaux ou animaux.

Un tel fractionnement existe déjà dans l'industrie alimentaire, qui fractionne le blé ou le lait, depuis quelques décennies. C'est ainsi que l'on prépare du son, de l'amidon, des protéines (gluten, par exemple), du pe-

le lait, des matières grasses à diverses températures de fusion, des poudres, etc. Pourquoi ne pas généraliser les techniques à d'autres produits végétaux ou animaux : la carotte, la pomme, la viande d'agneau, le merlan, le poisson... ? Depuis quelques années, à la Station INRA de Pech Rouge, les chercheurs réalisent la fraction polyphénolique totale d'un produit, les composés odorants qui sont libérés lors de la fermentation, les sucres.

Les techniques mises en œuvre sont classiques : distillations, évaporation sous pression réduite, filtrations.

L'industrie de l'eau, notamment, a perfectionné ses systèmes de filtration et produit des « cartouches », analogues dans leur principe à celles qui figurent dans les carafes de purification de l'eau. Ces systèmes séparent un liquide injecté sous pression en fractions déterminées par le type de filtre choisi. Nanofiltration, ultrafiltration, microfiltration, osmose directe, osmose inverse... Selon les techniques, on retire les ions, les oligosaccharides (glucose, fructose, saccharose, etc.), les acides aminés, les composés phénoliques, les pigments caroténoïdes ou chlorophylliens...

Voilà le cas des carottes dont le liquide, après broyage, a été placé dans un appareil qui, en quelques minutes, a séparé une « eau » assez pure d'un concentré des autres composés dissous. Un traitement supplémentaire, à l'aide d'une cartouche aux pores de taille différente, aurait poursuivi le processus et séparé les composés.

Ces fractions, plus « élaborées » que le produit de départ initial, peuvent être vendues à un prix supérieur à celui du produit initial, et l'on peut souhaiter que ce type de méthodes contribuera à l'enrichissement des agricul-

teurs indispensables à notre économie et à la sauvegarde de notre environnement.

Pour les cuisiniers, ce sera la source d'ingrédients culinaires nouveaux, préparés à partir de produits de l'agriculture ou de l'élevage actuels. Évidemment, la cuisine à l'aide de ces matières ne sera pas de la cuisine note à note « pure », mais un bon début.

On apprendra ensuite à craquer les tissus végétaux et animaux, en vue de la préparation de nouveaux ingrédients (dans le fractionnement, on se limite à séparer des composés ; dans le craquage, on modifie les composés au cours du traitement de séparation).

Un exemple de réalisation possible ? La sauce vol au vent se confectionne par mélange d'eau (environ 250 millilitres), de six feuilles de gélatine, d'une cuillerée à soupe de composés polyphénoliques de Syrah, une demi-cuillerée à café d'acide tartrique, une cuillerée de glucose ou peu de sel, une goutte de solution diluée de capsaïcine (ou, à défaut, d'une macération de piment dans de l'huile) ; on chauffe, on ajoute de la matière grasse (huile) en fouettant. À servir avec un flan un peu ferme fait de poudre d'œuf d'eau de 1 œuf, 3 cl. d'huile, essayé, c'est délicieux !

Avec ces techniques, le... goût pour les nouveaux goûts sera facile à satisfaire. ■



Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Nîmes (Académie des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr



→ MATHÉMATIQUES

Symétrie ou les maths au clair de lune

Marcus du Sautoy

Héloïse (2010), 320 pages, 2010
(519 pages, 26 euros).

Ce livre est un voyage mathématique à travers le monde mathématique de la symétrie. Marcus du Sautoy raconte sa propre quête de mathématicien à la recherche de la formule explicite de la symétrie géométrique. Il s'inscrit dans la longue lignée des adorateurs de la symétrie, de Platon décrivant ses solides aux créateurs du « Monstre », le dernier avatar des êtres supersymétriques des dimensions supérieures (alors que le carré ne compte que quatre axes de symétrie, il y a plus de symétries dans cette « superstructure » que d'atomes dans le Soleil), en passant par les mathématiciens arabes et anonymes qui ont conçu les mosaïques de l'Alhambra de Grenade.

Un témoignage de la façon bien mystérieuse dont travaillent les mathématiciens : professeur à Oxford, M. du Sautoy relie son oncogénèse à la physique des débris de la symétrie cachée dans les structures mathématiques. Il est le saint Simon de la communauté mathé-

matique. Évidemment, difficile de tout comprendre à la première lecture, mais comme la *Sonate au clair de lune* de Beethoven, vous en explorerez les beautés par des lectures successives qui dévoileront de nouvelles facettes du sujet et des intérêts de l'auteur.

M. du Sautoy vous fait ressentir pourquoi les mathématiques ne sont pas que de l'art. Si Beethoven n'avait pas existé, personne n'aurait écrit la sonate : la musique est affaire d'invention. En revanche, si Galois n'avait pas vécu, il semble probable que quelqu'un aurait démontré par les mêmes moyens la possibilité de résoudre par radicaux toutes les équations de degré supérieur à 5. La logique des structures est découverte par le raisonnement et l'apparition des vérités, inévitable à long terme, même si le cheminement de l'esprit du génie précurseur est difficilement identifiable. Car le génie a le choix dans sa démarche parmi les possibilités mathématiques : quand il découvre une voie, il cherche des outils pour sa nouvelle religion.

À la lecture du livre, le lecteur a envie de converser avec l'auteur sur la vérité des opinions fortes qu'il avance. Par exemple, M. du Sautoy prétend que la symétrie dans le monde animal apparaît comme un avantage évolutif par l'attraction sexuelle qu'elle implique (surtout chez les fleurs). Il affirme aussi qu'un mathématicien a besoin d'être torturé pour être productif. Ces affirmations et d'autres sont discutables dans le sens noble du terme (autant que ce ne sont peut-être que de d'intéressantes facettes (les scientifiques aiment bien ces provocations).

Toutefois, comme l'art, les mathématiques n'existent pas avant d'être communiquées pour que la communion dans la beauté dévoilée puisse s'opérer. Merci à

M. du Sautoy, grand contributeur à la diffusion des connaissances mathématiques, vulgarisateur comme il n'en apparaît dans le monde qu'un ou deux par décennie.

Si vous devez emmener un livre de mathématiques lors de votre prochaine excursion dans une île intellectuellement déserte, emportez les *Maths au clair de lune*.

→ COSMOLOGIE

Le théorème du jardin

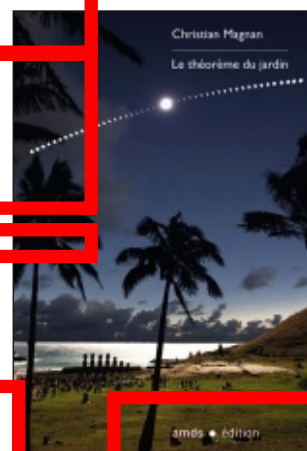
Christian Magnan

amds (2011), 304 pages, 2011
(304 pages, 22 euros).

La découverte par la lunette de Galilée de milliers d'étoiles nouvelles si « inutiles » à l'homme a brutalement détruit le concept selon lequel « Dieu ne crée rien en vain ». Comment croire encore que l'être humain est la finalité de l'Univers ? C'est cette question centrale qu'a souhaité aborder de front Christian Magnan, astrophysicien reconnu pour ses constants efforts de médiation scientifique.

La première partie de l'ouvrage relate la question dans un large contexte à travers un exposé classique mais où les jalons de la révolution scientifique sont explicités de façon très pédagogique : remise en cause de l'ordonnement du Système solaire par Copernic, rejet des sphères célestes et introduction de l'ellipse par Kepler, révélation de la lunette de Galilée, découverte de la force d'attraction par Newton et rôle des comètes pour assés cette nouvelle vision de l'ordre cosmique.

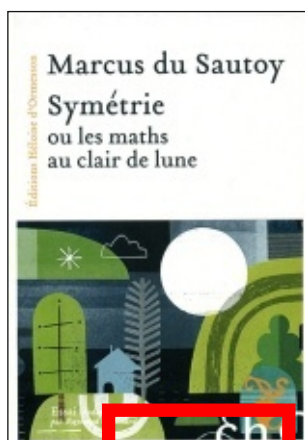
Après ce parcours historique, l'auteur expose de façon claire l'élaboration des différentes méthodes



de mesure des distances dans l'Univers qui, élargissant notre horizon, ont conduit au concept de l'expansion de l'espace-temps « courbé » par la matière et à notre vision einsteinienne de la cosmologie. Le « théorème du jardin » y illustre le fait que, pour que cette courbure soit perceptible, il faut que le jardin soit suffisamment grand au-delà d'une certaine limite qui fait encore aujourd'hui l'objet d'un intense débat.

L'originalité de l'ouvrage réside dans sa dernière partie, où l'auteur critique de façon très directe – certains diront excessive – les biais de certains cosmologistes enclins à attribuer une pseudofinalité à l'Univers à travers « un prétendu principe de complexité » : celui-ci stipulerait que seul un réglage infiniment fin des paramètres de l'Univers aurait permis l'apparition de la vie. Il s'agit là d'une sidérante tautologie, car étoiles, planètes, atomes, arbres ou fourmis pourraient arriver à la même conclusion : ce qui existe a été fait pour que cela existe !

Enfin, dans sa conclusion, l'auteur souligne l'indigence de la réflexion théorique et certaines dérives de la cosmologie moderne comme celles qui conduiraient à « l'imposture de la matière noire ». Peut-on vraiment parler de théo-



rie de l'Univers lorsque 95 pour cent de son contenu est de nature inconnue ? On l'aura compris, ce livre ne mise pas au consensus habituel et pourra surprendre. En réalité, s'il n'est pas exempt de petits défauts, il a le grand mérite de souligner le manque de réflexions critiques sur la cosmologie et l'absence de véritables nouvelles. Il intéressera tout ceux qui s'interrogent sur les limites de notre compréhension actuelle de l'Univers.

→ Jean-Marc Bonnet-Bidaud

Service d'astrophysique, CNRS, Saclay

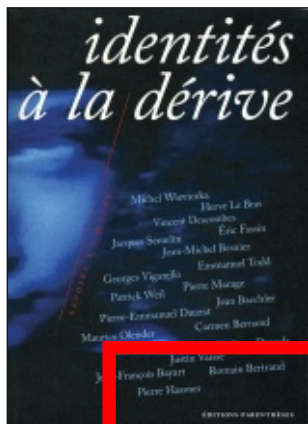
→ SOCIOLOGIE

Identités à la dérive

Spyros Theodorou (dir.)

Parthène, 2012
(384 pages, 18 euros).

Après le débat ouvert en 2009 par le gouvernement sur l'identité nationale, qui suscita des critiques et fut enterré dans la plus grande discrétion, les ques-



tions d'identité font toujours rage dans notre pays, comme en témoigne la polémique récente sur l'inégalité supposée des civilisations... Sur ces débats agitant la sphère politique, les sciences humaines ont beaucoup à dire. La preuve dans ce gros volume qui regroupe les textes

de spécialistes reconnus de différentes disciplines sur le thème de l'identité. Il s'agit de montrer l'étendue des problèmes posés par cette notion et de faire le tour des questions d'actualité qui s'y rattachent.

D'où vient le mot ? Le philosophe V. Desbordes explique qu'il prend un sens nouveau dans les années 1950 aux États-Unis, sous l'influence d'un psychanalyste, Erik Erikson. Celui-ci définit l'identité comme l'état d'une crise d'appartenance culturelle – un sentiment touchant à tant tout les membres de minorités : Noirs, Indiens, femmes... Ces crises identitaires affectent aujourd'hui un pays comme la France, dans lequel son modèle d'intégration républicaine semble en panne. C'est pourquoi le sociologue M. Wiewiorka propose de repenser la nation en reconnaissant les identités culturelles des différentes minorités issues de l'immigration ou de l'émigration.

Toutefois, pour J.-F. Bayart, les identités culturelles sont une invention récente, due à la centralisation des États-nations au XIX^e siècle. Et les emblèmes identitaires résultent d'une reconstruction *a posteriori* : la totem n'est en rien un symbole méditerranéen, puisqu'elle vient des Aztèques ! Reste que le maniement des symboles identitaires peut mener à des massacres, explique J. Jémelin. Les génocides du XX^e siècle sont nés en contexte de crise, une occasion saisie par des intellectuels pour instrumentaliser les peurs populaires, afin de fabriquer un consensus identitaire entre « eux » et « nous ». Se nourrissant du ressentiment, la représentation de l'Autre comme ennemi permet alors le passage à l'acte violent. On mesure tout l'intérêt qu'il y a à analyser la notion d'identité.

→ Régis Meyran

Docteur de l'École des hautes études en sciences sociales

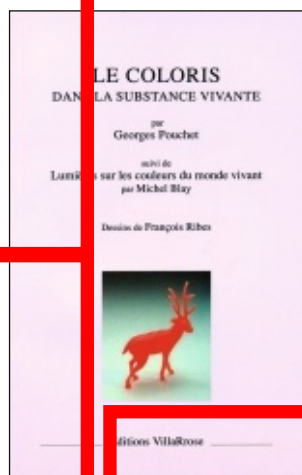
→ HISTOIRE DES SCIENCES

Le coloris dans la substance vivante

Georges Pouchet et Michel Blay

Villa Rose, 2012
(105 pages, 12 euros).

Mais que se cache la seconde moitié du XIX^e siècle animé par une curiosité insatiable, Georges Pouchet nous livre le fruit de son observation émer-



veillée de la nature. Héritier de la démarche expérimentale de Claude Bernard, il nous plonge, dans un style riche et subtil, au cœur d'une réflexion scientifique très avant-gardiste sur le monde des couleurs.

Pas donné par les couleurs dans la nature, il a soutenu sa thèse de médecine en 1864 sur les colorations de l'épiderme (sous le Second Empire, il existe un vaste courant de recherches anthropologiques dont l'objectif est de légitimer scientifiquement la théorie des races humaines). Mais Pouchet a prolongé ensuite sa réflexion sur la signification des couleurs dans le monde animal et végétal. Il rassemble le fruit de ses recherches dans une monographie, dont la réédition constitue

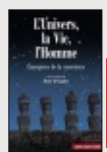
Brèves

LA RÉVOLUTION DU PAISIR FÉMININ

Élisa Brunet

Odile Jacob, 2012
(464 pages, 21,90 euros).

Le plaisir féminin est-il de nature à être révolutionné ? Non, mais vécu oui. Comme bien écrit, ce recueil d'enquêtes explore les aspects, notamment scientifiques, et prend compte par de multiples interviews de l'évolution de la sexualité féminine. En France, à la fin de sa Bastille dans les années 1970, le « peuple » des femmes a pris les choses du sexe en main. Tant mieux !



L'UNIVERS, LA VIE, L'HOMME

Henry de Lumley (dir.)

CNRS éditions, 2012
(220 pages, 20 euros).

Le titre de ce livre pourrait aussi bien être « L'homme dans l'univers », tant il balaie de sujets concernant l'évolution de la matière, de la vie, de sa partie humaine, donc la conscience... Issu d'un cycle de conférences en 2010 au collège de Bernardini à l'Université de Lumley, il rassemble les interventions passionnantes de nombreux grands scientifiques.

LES RONGEURS DE FRANCE

J.-P. Chéré et H. Le Louarn

Quæ, 2012
(312 pages, 9 euros).

Hautes, écosystèmes, relations avec l'homme... cet ouvrage présente les 31 espèces de rongeurs présentes en France, et fournit les moyens de les identifier. Il décrit aussi les dégâts et les problèmes sanitaires qu'elles occasionnent, ainsi que les moyens de lutte... de protection – dont le meilleur consiste à protéger les prédateurs qui régulent le nombre des rongeurs.



À lire

LA TENTATION DU BITUME

Eric Hamel et Olivier Bazemon
Rue de l'écliquier, 2012
(224 pages, 14 euros).

Le étalement urbain n'épargne pas la France : l'équivalent d'un département est artificialisé tous les sept ans ! Cet ouvrage enlevé fait le point avec humour sur un phénomène qui a de lourdes conséquences sociales et qui n'a pas pour seule origine la mode des résidences individuelles. Il précise les ouages et les multiples responsabilités de ce phénomène, fait pour la société et l'environnement. Un sombre tableau avec quelques lueurs d'espoir, dont tout citoyen devrait être conscient.

PORTRAIT DU SCIENTIFIQUE EN REBELLE

Freeman Dyson
Actes Sud, 2011
(329 pages, 15 euros).

Au fil des comptes rendus, préfaces et textes divers du physicien britannique – qu'il a choisis et rassemblés – sur des hommes de science qui l'ont marqué et leurs choix sociétaux, sur les enjeux politiques de la science, un portrait se dessine : celui d'un scientifique profondément attaché à la compréhension humaine.

UN ÉLÉPHANT DANS MA SALLE D'ATTENTE

Florence Ollivet-Couet
Sylvie Overnois
Berg, 2012
(200 pages, 10 euros).

O pérer une éléphant d'une catastrophe, poigner un bébé lynx grognon, anécher une lionne échappée... Tel est le quotidien de Florence Ollivet-Couet, écrivain de la faune sauvage. Avec humour et passion, elle décrit son métier et les multiples mésaventures qui le jalonnent.

la première partie de ce passionnant petit livre.

Si la formulation du raisonnement scientifique peut paraître démodée aujourd'hui, reconnaissons à ce texte une grâce, une poésie, un style qui témoignent d'une grande sensibilité et d'une acuité à révéler la beauté des choses chez cet humaniste ami de Flaubert. Ce qui fait tout l'intérêt du texte c'est l'éclectisme de l'approche du sujet : regard du physicien, offrant un concentré des connaissances de l'époque ; regard du naturaliste et de l'entomologiste qui amène à réfléchir à la finalité de ce chatoiement de couleurs dans la nature.

L'intérêt de cet ouvrage tient aussi à la seconde partie. L'historien des sciences Michel Blay offre une synthèse de la construction de la pensée autour de la perception des couleurs et de leur interprétation. Dans la seconde moitié du XVIII^e siècle, les travaux de Newton sur la décomposition de la lumière par le prisme ont définitivement libéré cette pensée du cadre aristotélésien et ouvert la voie aux découvertes décisives des XIX^e et XX^e siècles, telles que la description de la nature ondulatoire de la lumière par Foucault et Fresnel et les travaux d'Einstein et de Louis de Broglie sur la théorie quantique.

Au-delà de ce rapide survol se posent de nombreuses autres questions : quels sont les mécanismes physico-chimiques moléculaires à l'origine de la diversité des couleurs dans le monde animal et végétal ? À quoi servent ces parures chromatiques flamboyantes : effrayer le prédateur ? Attirer la femelle ? Se camoufler ? Moyen de communication avec les congénères ou d'autres espèces ? Moyen de régulation thermique du corps et de résistance à

les pistes de réflexions auxquelles M. Blay nous invite.

→ Bernard Schmitt

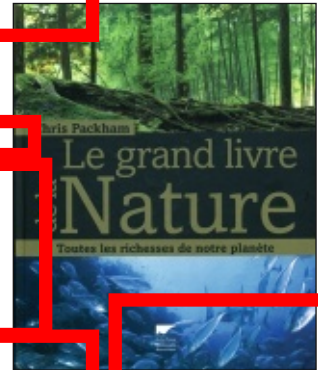
→ SCIENCES NATURELLES

Le grand livre de la nature

Chris Packham
Delachaux et Niestlé, 2011
(245 pages, 19,90 euros).

Ce livre invite les esprits curieux à aller voir ce qui se passe dans la nature, particulièrement celle située près de chez soi. Plus facile et gratifiante à observer. Il témoigne combien la découverte par soi-même de la biodiversité et la compréhension des liens entre espèces peuvent être une source d'émerveillement et de satisfaction. Que l'on soit adulte ou enfant, parcourir ce livre suscitara l'envie, puis la joie de se promener grâce à des activités suggérées et à d'utiles conseils : enregistrer les chants d'oiseaux en forêt et les identifier, réaliser des croquis, photographier un endroit au fil des saisons, explorer une prairie calcaire par une journée ensoleillée quand les insectes sont actifs, fabriquer un leurre de sable dans son jardin pour découvrir quels animaux le visitent.

Tous les grands types d'habitats abritent faune et flore sauvages sont évoqués : espaces agricoles, forêts, landes, maquis, prairies herbacées, montagnes, plages, falaises, zones humides, côtières, océans, toundra, banquise, déserts sans oublier le parc urbain, les jardins ou nos maisons. La diversité et les par-



ticularités de chaque milieu sont présentées aux côtés d'espèces que l'on y rencontre. La mise en pages et les nombreuses photos et croquis légendés font un ouvrage coloré et agréable à parcourir.

Bien sûr, il s'agit d'un livre grand public. D'autres documents sont nécessaires pour approfondir la connaissance des espèces et des phénomènes naturels au sein des différents habitats, d'autant que l'ouvrage ne se focalise pas sur un secteur biogéographique donné et privilégie une vision d'ensemble des biomes présents sur la Terre. On pardonnera à l'auteur quelques erreurs ou imprécisions, par exemple cette feuille de charme présentée comme étant une feuille de hêtre, ou le premier habitat des cerfs qui fut les forêts et non la forêt. Cet ouvrage est un peu comme le livre d'éveil de notre enfance ! En ces temps parfois moroses, Chris Packham fait bien d'encourager le public à retourner voir les beautés naturelles en le guidant. D'autant que connaître et comprendre est une étape nécessaire pour aimer, gérer et protéger.

→ Régine Jourrait

UNE VILLE - Catterêts

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur :

www.pourlascience.fr