

SONDAGE INTERNATIONAL : Faites-vous confiance à la science ?

■ POUR LA SCIENCE

Octobre 2010 - n° 396

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

L'homme a-t-il failli disparaître ?

Chassé par le froid,
il survécut sur les côtes
d'Afrique du Sud

Exoplanètes

Parfois tout aussi
accueillantes que la Terre

Le bisphénol A

Quels risques pour la santé ?

Les lasers aléatoires

L'effet laser avec...
juste de la poudre !

M 02687 - 396 - F: 6,20 €

Biologie évolutive

Un livre
évènement !

La communauté des évolutionnistes francophones, forte de sa richesse et sa diversité, a souhaité produire un ouvrage de référence destiné aux chercheurs et aux étudiants en Master et Doctorat.

Cette œuvre, unique en langue française, aborde tous les grands thèmes de la biologie évolutive :

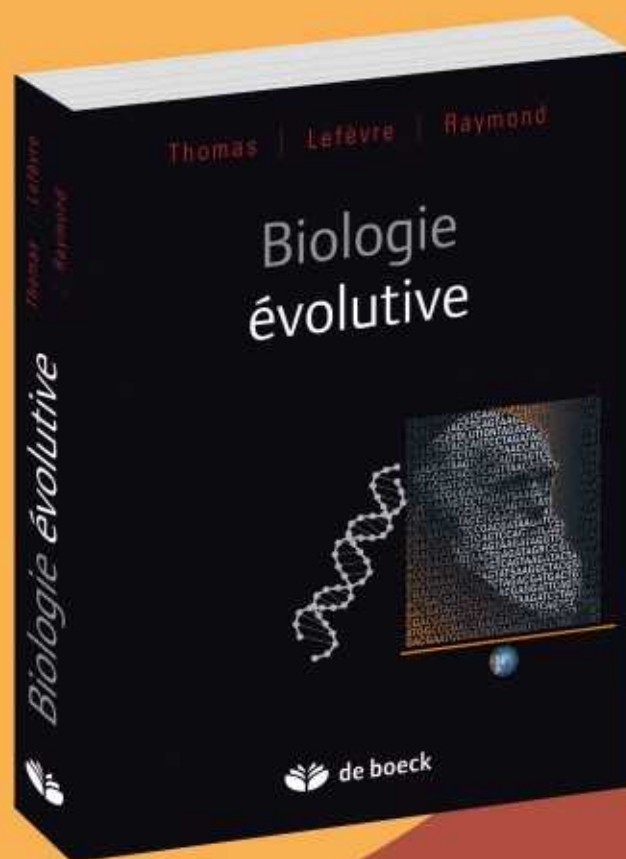
- la génétique des populations et des métapopulations
- l'écologie comportementale
- les analyses phylogénétiques
- l'évolution des traits d'histoire de vie
- l'évolution moléculaire
- la biologie évolutive humaine
- les interactions entre espèces
- l'évolution du sexe
- l'évolution expérimentale, etc....

En savoir plus sur :

<https://sites.google.com/site/biologieevolutive/>

“

Un ouvrage majeur dans un domaine qui reste, 150 ans après Darwin, à la pointe de la recherche.”



Sous la direction de :
Frédéric Thomas,
Thierry Lefèvre,
Michel Raymond

840 p. - Parution août 2010 - 89.00 €



de boeck

En librairie et sur www.deboeck.com

POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction - Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Pour la Science :

Rédacteur en chef adjoint : Maurice Mashaal
Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier,
Philippe Ribeau-Géssippe, Bénédicte Salthun-Lassalle,
Jean-Jacques Perrier

Dossiers Pour la Science :

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Rédacteur : Guillaume Jacquemont

Cerveau & Psycho :

Rédacteur : Sébastien Bohler

L'Essentiel Cerveau & Psycho :

Rédactrice : Émilie Auvrouin

Directrice artistique : Céline Lapet

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet,
Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Géssippe

Marketing : Heidi Chappes

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 : Laurent Fasano,
Edgar Gomes, Bernard Helffer, Daniel Joly, Alain Léger,
Christophe Pichon, Pascale Senellart, Daniel Tacquenet.

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 Grémillon. 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 dossiers ou de magazines :

02 37 82 06 62 (de l'étranger : 33 2 37 82 06 62)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal,
Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châteaux, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

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

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

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors : Ricky
Rusting, Philip Yam, Gary Stix, Davide Castelvecchi, Graham Collins, Mark
Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate
Wong. President : Steven Inchcoombe. 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 conte-
nus 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'adap-
tation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le
nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific Ame-
rican, 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-Augus-
tins - 75006 Paris).



Choisir et décider

Comment décider ? Comment choisir quand plusieurs options sont possibles ? Pour Aristote, le choix est le « désir délibératif des choses qui dépendent de nous ». En d'autres termes, une décision ne peut concerner que des événements sur lesquels nous avons prise ; elle nécessite une réflexion – une délibération – et une conclusion dont l'aspect subjectif – le désir – n'est pas exclu. Parfois, la décision est évidente, les données étant assez tranchées pour que le choix de la solution adaptée s'impose.

Mais, bien souvent, plusieurs options restent en lice. Quand il s'agit d'une décision concernant un groupe, on évalue les alternatives possibles, l'intérêt général et l'impact de la décision sur le bien-être collectif. Quand ce dernier risque d'être menacé, le principe de précaution est appelé à la rescousse.

En 1979, le philosophe allemand Hans Jonas a énoncé le principe de responsabilité, qui impose d'abandonner toute technique ou pratique mettant en péril l'intégrité ou la survie de l'humanité dans son ensemble. Quand ce n'est plus l'humanité dans son existence qui est menacée,

Disposer de suffisamment d'informations

mais sa santé ou l'environnement, le principe de responsabilité devient principe de précaution. Aujourd'hui, ce dernier est invoqué lors des décisions difficiles à prendre faute de données scientifiques validées.

Les exemples abondent. C'est le cas des polluants hormonaux, ou perturbateurs endocriniens. De nombreux pesticides ou polluants industriels se comportent comme des hormones naturelles. Chez l'animal, ils ont des conséquences délétères, notamment sur le système reproducteur. Par ailleurs, on constate chez certaines personnes des stérilités inexplicables. Peut-on incriminer les perturbateurs endocriniens ? Peut-on transposer directement à l'homme les résultats obtenus chez l'animal ? Pour l'affirmer, il faudrait disposer de suffisamment d'informations.

Les perturbateurs endocriniens sont nombreux et persistent dans l'environnement. Les recherches sur ces substances se poursuivent, mais en attendant de mieux comprendre leurs effets, quelques décisions ont été prises. Ainsi, les enfants étant les plus exposés et les plus fragiles, certains fabricants ont choisi d'éliminer le bisphénol A des biberons qu'ils produisent, avant même d'y être contraints par une loi (voir *Les polluants hormonaux*, page 32, et *Le bisphénol A, un danger pour la santé ?*, page 42). Ils ont appliqué le principe de précaution à leur échelle. Teinté de quelques arrière-pensées commerciales ?

1 **ÉDITO**4 **BLOC-NOTES**

Didier Nordon

Actualités

7 **Bien servir le champagne**7 **Que devient le pétrole de Deepwater Horizon ?**8 **Le palmarès 2010 des mathématiciens**10 **La mémoire des muscles... et bien d'autres sujets.**12 **ON EN REPARLE**

Opinions

14 **POINT DE VUE**
Mathématiques françaises : un avenir à assurer

Patrick Gérard

15 **ÉCONOMIE**
Voulant favoriser la concurrence...

Ivar Ekeland

16 **DÉVELOPPEMENT DURABLE**
L'écoconception des appareils électroniques

Françoise Berthoud

18 **VRAI OU FAUX**
Les vrais jumeaux ont-ils les mêmes empreintes ?

Clémence Carron

19 **COURRIER DES LECTEURS**20 **SONDAGE**
Faites-vous confiance à la science ?

Sur la totalité des numéros :
deux encarts d'abonnement pages 24 et 25.
Encarts commande de livres et abonnement pages 76 et 77.
En couverture : © Per-Anders Petterson

À LA UNE

24 **PALÉONTOLOGIE HUMAINE****Quand la mer sauva l'humanité**

Curtis Marean

Les conditions climatiques qui ont suivi de peu l'apparition d'*Homo sapiens* étaient si rudes qu'elles auraient pu faire disparaître notre espèce. Grâce aux ressources de la côte Sud de l'Afrique, une toute petite population – sans doute nos ancêtres – y survécut.

32 **ENDOCRINOLOGIE****Des polluants hormonaux**

M. Tohmé, J.-P. Cravedi et V. Laudet

Les perturbateurs endocriniens sont des substances de l'environnement qui agissent comme les hormones dans l'organisme ou en bloquent l'activité. Ils auraient des conséquences néfastes sur la santé. Reste à mieux comprendre leurs modes d'action pour limiter leurs effets.

42 **BIOCHIMIE****Le bisphénol A : un danger pour la santé ?**

Heather Patisaul

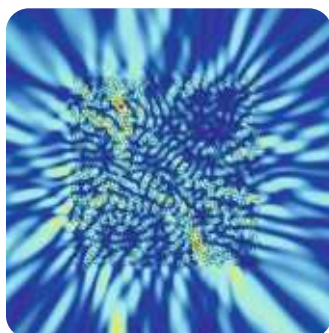
Un composant des plastiques, le bisphénol A, modifie, chez le rat, l'organisation de certaines régions cérébrales et perturbe la reproduction. Il n'est pas avéré qu'il en soit ainsi chez l'homme, mais, principe de précaution oblige, mieux vaut limiter l'exposition à cette substance.

50 ASTRONOMIE**Des super-Terres accueillantes***Dimitar Sasselov et Diana Valencia*

Il existe sans nul doute d'innombrables planètes extrasolaires. Mais à quoi ressemblent-elles ? Les modèles suggèrent qu'un grand nombre d'entre elles seraient semblables à la Terre, et susceptibles d'abriter la vie.

**58 CLIMATOLOGIE****La toundra, la taïga et le réchauffement climatique***Matthew Sturm*

Dans les régions boréales, le réchauffement climatique réduit la surface occupée par les glaces, et modifie celle de la toundra et de la taïga.

**66 PHYSIQUE****Le laser aléatoire : un vrai laser ?***Patrick Sebbah et Christian Vanneste*

Des milieux diffusants et désordonnés peuvent engendrer un effet laser. Ces nouveaux lasers suscitent l'intérêt tant des chercheurs que du monde industriel.

74 ARCHÉOLOGIE**Les esclaves des tombes néolithiques***A. Testart, Ch. Jeunesse, L. Baray et B. Boulestin*

Les Européens d'il y a quelque 6 000 ans inhumèrent souvent plusieurs personnes en même temps. L'analyse de leurs tombes suggère qu'une ou plusieurs personnes dépendantes d'un personnage principal, sans doute ses esclaves, l'accompagnaient dans la mort.

Regards**82****HISTOIRE DES SCIENCES****Cendrillon et la querelle de l'argonaute***Josquin Debaz*

Naturaliste amateur éclairée, précurseur en aquariologie, Jeanne Villepreux-Power était une autodidacte passionnée. Ses travaux sur l'argonaute ont résolu une captivante controverse de la biologie marine du XIX^e siècle.

88**LOGIQUE & CALCUL****Les nombres premiers insolites***Jean-Paul Delahaye*

Repérer les nombres premiers dotés des plus étranges propriétés est un passe-temps qui demande imagination, persévérance et savoir-faire arithmétique.

94**ART & SCIENCE****Les yeux de Rembrandt***Loïc Mangin***96****IDÉES DE PHYSIQUE****Une tornade réfrigérante : le tube à vortex***Jean-Michel Courty et Edouard Kierlik***100****SCIENCE & GASTRONOMIE****La lumière gâte-t-elle les légumes ?***Hervé This***102****À LIRE**

Rendez-vous sur **SCIENCE.fr**

» Plus d'informations

- L'intégralité de votre magazine en ligne
- Des actualités scientifiques chaque jour
- Plus de 5 ans d'archives
- 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

→ POUR LA SAUVEGARDE DES INDIFFÉRENTS

Paradoxe sur la biodiversité. Presque personne, aujourd'hui, n'ose se présenter comme indifférent à la question de la biodiversité - le faire, c'est courir au-devant d'une réprobation quasi unanime. Autrement dit, une variété a proliféré au sein de l'espèce humaine, celle des adeptes de la biodiversité, et elle a étouffé une autre variété, qui, par suite, se trouve en voie d'extinction, celle constituée par les indifférents. Or toute extinction appauvrit la biodiversité. Les tenants de celle-ci seraient donc plus cohérents s'ils s'employaient non à combattre la variété des indifférents, mais à la protéger : défendre la biodiversité veut qu'on défende aussi ceux qui ne la défendent pas.



→ EFFET PAPILLON LITTÉRAIRE

L'auteur se couche, satisfait d'être parvenu au terme du premier jet d'un article. Le lendemain, mille défauts inaperçus dans le feu de l'écriture lui sautent aux yeux. Il modifie alors l'ordre des paragraphes, rend l'argumentation plus cohérente, supprime des redites, puis se couche. Le lendemain, il constate que les lourdeurs, les obscurités, sont loin d'avoir disparu. Il répare, puis se couche. Le lendemain ne voit pas la fin de ses peines : certains termes ne sonnent pas

justes, il faut mettre plus d'accent sur les idées principales, atténuer des formulations excessives.

Vient le jour où le texte se stabilise. On pourrait substituer tel adjectif à tel autre, certes, mais cela ne changerait plus grand-chose. Cependant, l'auteur est sage et laisse reposer le texte. Suite à quoi, c'était inévitable, de nouvelles retouches deviennent nécessaires. Il s'y livre.

Enfin, le texte résiste au temps. Même relu après plusieurs jours de mise à l'écart, il n'a plus besoin de rien. Bon pour l'envoi ! Au moment d'accomplir le geste, l'auteur jette un dernier coup d'œil. Un détail le frappe alors : une virgule mal placée. Il la déplace donc, mais cela déséquilibre la phrase. Il faut la réécrire. Réécrite, la phrase ne s'insère plus bien dans le paragraphe auquel elle appartenait. Elle doit en rejoindre un autre, lequel se trouve d'un coup anéanti, parce que l'auteur se rend soudain compte que ce paragraphe est contredit par la phrase qu'il pensait lui adjoindre. De proche en proche, tout le texte est à refaire.

Ainsi, le déplacement d'une virgule peut entraîner l'effondrement de l'ensemble d'un texte. Ce phénomène porte le nom d'effet papillon littéraire.

→ LA VOIX DE SON MAÎTRE

Souvent, quand il s'agit de savoir si une grève a été bien suivie, la presse se borne à citer deux chiffres : la proportion de grévistes selon la direction, x pour cent, et celui selon les syndicats, y pour cent. Cette information est sans doute exacte : les nombres x et y sont sans doute bien ceux fournis à la presse. Mais elle ne dit rien de la proportion réelle de grévistes, z pour cent. Tout au plus peut-on supposer vérifiée la double inégalité $x < z < y$.

Ainsi, la presse donne une information exacte, mais secondaire, et renonce à donner une information plus signifiante, quoique moins précise : une évaluation de z obtenue sans se laisser influencer ni par



ceux qui ont intérêt à la grossir ni par ceux qui ont intérêt à la diminuer. La presse ne remplit pas sa fonction lorsqu'elle se contente de rapporter sans se compromettre les versions contradictoires des parties au conflit. Répéter n'est pas informer.

→ RÉALISME RÉVÉLATEUR

Voici deux énoncés, peut-être vrais, tous les deux, peut-être faux, mais synonymes :

- Les portraits que nous avons de Newton sont réalistes ;
- Ils ressemblent au modèle qu'ils représentent.

Passons maintenant de l'homme à l'œuvre, et voyons si cette synonymie s'étend à la loi de la gravitation du même Newton :

- La loi de Newton est réaliste ;
- Elle ressemble à ce qu'elle représente.

Cette fois, la première affirmation est vraie, en ce sens que la loi de Newton décrit le mouvement des corps avec précision, mais la seconde est absurde. La formule kmm'/r^2 n'a aucune ressemblance avec la force agissant entre les corps de masses m et m' et de distance r ! Ainsi, le réalisme, en peinture, consiste en une ressemblance ; en science, il n'a rien à voir avec une ressemblance.

Le réalisme scientifique, à son tour, présente une bifurcation surprenante. Pour un athée, il a vocation à épuiser la réalité ; sans doute ne saura-t-on jamais tout, mais aucun aspect de la réalité n'est, par nature, plus

caché que les autres et destiné *a priori* à toujours rester inaccessible. Pour un croyant, le réalisme scientifique a vocation à ne décrire qu'une partie de la réalité, et pas la plus significative ; la réalité échappe aux hommes non seulement parce qu'elle est trop vaste, mais aussi parce que sa nature les transcende.

En somme, dites-moi quelle est votre conception du réalisme, et je saurai à peu près tout de votre rapport au monde !

→ UNE QUESTION DOIT ÊTRE OUVERTE OU FERMÉE

Il n'est pas de « vraies questions », ni de « questions ouvertes », il n'est que des questions : toute question posée et encore en suspens est, *ipso facto*, une vraie question. Seules les réponses sont susceptibles d'être fausses. Pourquoi, alors, les formulations « Ceci est une vraie question » ou « Cela est une question ouverte » sont-elles si fréquentes ? C'est que nous sommes ébahis par la folle quantité de savoir que notre société accumule. Chaque fois, il nous faut un effort



pour reconnaître qu'elle est loin de tout maîtriser. Les expressions « vraie question » et « question ouverte » ne sont pas tant des pléonasmes que des façons d'insister pour nous faire entrer dans la tête ce que nous sommes *a priori* peu disposés à admettre : il reste des questions qui nous échappent complètement.

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques
la plus importante collection d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines

Claude Aubriet
Artiste naturaliste des Lumières
Aline Hamonou-Mahieu

217 pages
ill. couleur
2 x 27 cm
35 €

ISBN 978-2-7355-0703-0

Les Vitraux de la cathédrale d'Angers
Karine Boulanger

544 pages
ill. couleur
24 x 31,5 cm
96 €

ISBN 978-2-7355-0722-1

Voyages et voyageurs
Sources pour l'histoire des voyages
Thérèse Charmasson (dir.)

400 pages
ill. noir et blanc
17 x 22 cm
29 €

ISBN 978-2-7355-0711-5

La part de l'œil
une ethnologie du Maghreb de France
Slimane Touhami

298 pages
ill. noir et blanc
16 x 24 cm
28 €

ISBN 978-2-7355-0720-8

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

Archéologie

Un village gallo-étrusque à Lattes

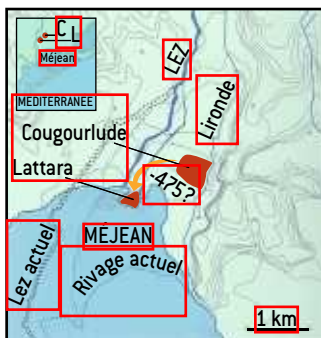
Un grand village gaulois fouillé à Lattes, dans l'Hérault, est sans doute l'ancêtre de Lattara, le comptoir étrusque établi vers l'an 500 avant notre ère dans le delta du Lez.



LEZ, HÉRault



À gauche, les restes d'un foyer gaulois. Au centre, une vue d'ensemble des fouilles. Ci-dessous, une amphore (esquisse) provenant de Vulci, en Étrurie, a été enfouie dans le sol d'une cuisine pour la stocker.



Alors que le village gallo-étrusque de la Cougourlude était installé le long de la Lironde, qui se jette dans la lagune de Méjean, Lattara a été construite vers l'an 500 avant notre ère sur la presqu'île de la même lagune, qui constituait le point d'abordage le plus commode. Depuis l'Antiquité, le cours du Lez s'est déplacé vers l'Ouest, tandis que le rivage de la lagune a avancé vers le Sud.

Les commerçants au long cours de l'Antiquité cherchaient à fonder des comptoirs à l'embouchure des fleuves. Tel a été le cas à Marseille (bouches du Rhône) ou à Agde (bouches de l'Hérault). C'est le début d'une histoire de ce genre que l'équipe d'Isabelle Daveau, de l'INRAP, documente en fouillant le village gaulois de la Cougourlude, fondé vers 550 avant notre ère non loin de l'ancienne embouchure du Lez, au Sud de Montpellier.

Dans ce village de 17 hectares vivaient sans doute plus de 1 000 habitants. On y voit surtout les traces des trous où l'on calait les poteaux entre lesquels on érigait des murs en torchis surmontés de toits de roseaux. Le plan d'ensemble du village suggère une place centrale et ses échoppes. Non loin de là, des scories signalent une forge. À l'autre extrémité du village, un four de potier atteste de la production sur place des grossières poteries indigènes.

De meilleure facture sont les restes de poteries étrangères – fine vaisselle à boire attique, quelques amphores massaliotes, nombreuses amphores étrusques accompagnées de *bucchero nero*, vaisselle noire caractéristique de l'Étrurie. Fouillées au XIX^e siècle, les tombes de la région ont livré de la vaisselle de bronze étrusque très appréciée des Gaulois ; et le sanctuaire situé aux marges du village contenait un dépôt sacrificiel de 300 disques de bronzes.

Comme cette façon de sacrifier est typiquement étrusque, il semble bien que les étrangers qui vivaient avec les autochtones à la Cougourlude étaient avant tout des Étrusques. Un fait connu sur ces derniers est qu'au VI^e siècle, ils étaient hellénisés, ce qui se traduisait par leur goût pour la vaisselle attique. Avec les Gaulois, ils échangeaient vin et fer contre étain, fourrures, sel et même des esclaves. La présence d'amphores massaliotes rappelle toutefois qu'au

VI^e siècle, Massalia, à peine fondée, montait en puissance...

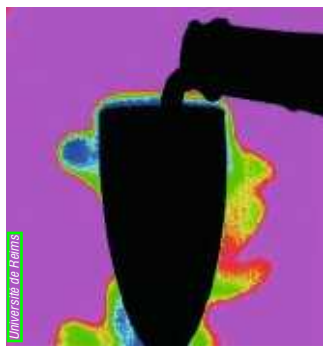
Peut-être est-ce justement pour réagir à la pression massaliote que, vers -500, les Étrusques du Lez établissent un comptoir fortifié à 800 mètres de la Cougourlude : Lattara. Ils s'installent avec femmes et enfants. Mais, vers -475, Lattara est détruite par le fer et le feu. Peu après, tandis que la Cougourlude disparaît, Lattara est réinvestie par des autochtones et par des Grecs. Alors que quelques années plus tôt, les amphores étaient étrusques, 90 pour cent des tessons sont désormais issus d'amphores massaliotes !

Que s'est-il passé ? Les Massaliotes ont-ils voulu détruire un comptoir étrusque intercalé entre Massalia et leur comptoir d'Agde ? Les habitants de la Cougourlude, mêlés à ce qui restait des Étrusques du Lez et à des Massaliotes, ont-ils alors refondé Lattara ? C'est en tout cas ce que suggèrent les constatations archéologiques.

→ François Savatier

Physique

Bien servir le champagne



Le nuage de dioxyde de carbone est moins étendu quand le champagne est servi froid, et dans une flûte en position inclinée plutôt que verticale.

Réception. Des serveurs remplissent les flûtes de champagne posées, debout, sur la nappe. Est-ce la meilleure façon de faire ? Non, répondent Gérard Liger-Belair, de l'Université de Reims, et ses collègues. Quand le champagne est versé, du dioxyde de carbone dissous s'échappe sous forme de bulles ou en diffusant à la surface. Or l'arôme, le goût et la sensation en bouche sont d'autant plus prononcés que la boisson, une fois servie, est riche en gaz. Les chimistes ont étudié la quantité de gaz dissous selon deux techniques de service (dans un verre vertical ou incliné, à la façon d'une bière) et selon la température (4, 12 et 18 °C). De plus, ils ont visualisé par thermographie infrarouge le nuage de dioxyde de carbone autour du verre. Les résultats sont sans appel : le dioxyde de carbone disparaît jusqu'à deux fois moins vite quand le champagne est versé dans une flûte inclinée. Et plus il est froid, plus le gaz est retenu. La prochaine fois, veillez à ce que votre Bollinger 1975 soit servi comme une bière.

→ Loïc Mangin

G. Liger-Belair et al., J. Agric. Food Chem., vol. 58(15), pp. 8768-8775, 2010

En bref

MÉMOIRE DE FOURMI

Comment une fourmi garde-t-elle son cap vers un objectif ? Des chercheurs britanniques ont montré que non seulement elle mémorise la position de points de repère, mais qu'elle corrige sa trajectoire en effectuant périodiquement de rapides bifurcations. En outre, la vitesse de ces réorientations dépend de leur angle, comme si la fourmi évaluait la différence angulaire entre la nouvelle position des points de repère et celle qu'ils avaient dans l'image mémorisée.

TT : ENCORE UN RECORD

Huit mois à peine après le record de calcul du nombre de décimales de π établi par Fabrice Bellard sur un simple ordinateur de bureau ($2,7 \times 10^{12}$ décimales, ou 2,7 trillions), Alexander Yee et Shigeru Kondo, au Japon, ont presque doublé la mise en calculant cette fois cinq trillions de décimales. Le calcul, qui utilise une méthode très proche de celle de F. Bellard, a été réalisé sur un ordinateur personnel poussé au maximum de ses capacités. Il a duré 90 jours et nécessité 25,8 téraoctets de mémoire.

PIGMENTS SONORES

En analysant 12 pigments inorganiques, tel le bleu de Prusse, par spectroscopie photoacoustique infrarouge, des chimistes canadiens ont observé que chacun émet un son qui lui est propre : chauffés par un laser infrarouge, les pigments répondent au changement de pression provoqué en produisant de faibles ondes acoustiques, lesquelles sont amplifiées par un microphone ultrasensible. Cette signature acoustique pourrait faciliter les recherches sur les œuvres d'art.

Environnement

Que devient le pétrole de Deepwater Horizon ?

L'explosion de la plateforme de forage *Deepwater Horizon* dans le golfe du Mexique, le 20 avril dernier, a provoqué la fuite de 780 millions de litres de pétrole brut jusqu'au 15 juillet, date de la mise en place d'un « bouchon » efficace. Que devient ce pétrole ? Des réponses contradictoires ont été données ces dernières semaines.

Le 4 août, un rapport de l'Agence océanique et atmosphérique américaine (NOAA) estimait que seuls 26 pour cent du pétrole répandu se trouvaient encore dans l'eau près de la surface ou sur le rivage. Le reste se serait dissous puis évaporé (25 pour cent), se serait scindé en microgouttelettes (24 pour cent), aurait été brûlé (5 pour cent) ou récupéré (20 pour cent) à la sortie du puits et à la surface. La plus grande partie des 26 pour cent restants serait en voie de biodégradation. Mais selon des scientifiques de l'Université de Géorgie, 70 à 79 pour cent du pétrole déversé et non récupéré à la sortie du puits (461 à 508 millions de litres) se trouveraient encore dans la mer.



L'une des méthodes d'élimination de la nappe de pétrole répandue dans le golfe du Mexique a consisté à la brûler.

Pour Jean Oudot, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, ces deux études raisonnent comme si le pétrole brut était homogène ; or c'est un mélange de milliers de composés. La catastrophe de l'*Amoco-Cadiz*, en 1978, a bien montré que les fractions lourdes – résines et asphaltènes, probablement non toxiques, et hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), toxiques – sont non dégradables et sédimentent au fond de la mer.

Selon une troisième étude américaine, réalisée en juin dernier sur un panache de pétrole profond (à 1 100 mètres), la concentration d'oxygène dissous indique que

les micro-organismes seraient peu actifs et la biodégradation peu intense. Mais d'autres chercheurs ont trouvé dans ce panache profond une proportion élevée de protéobactéries gamma, connues pour dégrader les hydrocarbures à basse température. Quelle est l'action des diverses espèces de micro-organismes ? En combien de temps digéreront-elles le pétrole répandu ? Quels seront les effets des fractions lourdes toxiques ? Réponse, peut-être, dans quelques mois ou années.

→ Jean-Jacques Perrier

Science Express, 19 et 24 août 2010 ; C. R. Chimie, vol. 13, pp. 548-552, 2010

Mathématiques

Le palmarès 2010 des mathématiciens

Le Congrès international des mathématiciens, à Hyderabad, en Inde, a décerné le 19 août dernier ses distinctions, notamment les médailles Fields. Trois Français figurent parmi les lauréats.

Tous les quatre ans, le Congrès international des mathématiciens se réunit et annonce, à son ouverture, les prix attribués par l'Union mathématique internationale. Ces récompenses sont considérées comme les plus prestigieuses distinctions en mathématiques, à l'exception peut-être du prix Abel décerné annuellement depuis 2003 par l'Académie norvégienne. Elles vont à des chercheurs de moins de 40 ans, sauf pour le prix Gauss et la médaille Chern.

Les médailles Fields

Les lauréats sont l'Israélien Elon Lindenstrauss, de l'Université hébraïque de Jérusalem, le Franco-Vietnamien Ngô Bao Châu, de l'Université de Paris-Sud (maintenant à l'Université de Chicago), le Russo-Suédois Stanislas Smirnov, de l'Université de Genève, et le Français Cédric Villani, directeur de l'Institut Henri Poincaré, à Paris.

Elon Lindenstrauss est récompensé pour « ses résultats sur la rigidité des mesures en théorie ergodique, et leurs applications à la théorie des nombres ». La théorie ergodique étudie les transformations qui laissent inchangées des mesures (par exemple les aires ou les volumes) sur des espaces, ces derniers pouvant être de natures très diverses. E. Lindenstrauss et ses collègues ont notamment appliqué des techniques de théorie ergodique à la « conjecture de Littlewood », qui décrit l'approximation d'une paire de nombres réels par des paires de nombres rationnels ayant même dénominateur.

Ngô Bao Châu s'est illustré en prouvant de façon générale, en 2008, le « Lemme fondamental », une conjecture énoncée en 1987 et qui est un élément clef du « programme de Langlands » formulé à partir de 1967 par le mathématicien canadien Robert Langlands. Ce programme est un vaste ensemble de conjectures tissant des liens assez précis entre la théorie des nombres, la théorie des fonctions dites automorphes et la théorie de la représentation des groupes.

Stanislas Smirnov est distingué pour « la démonstration de l'invariance conforme de la percolation et du modèle d'Ising bidimensionnel en physique statistique ». Il s'agit de preuves rigoureuses de certaines pro-

priétés de modèles bidimensionnels sur réseau étudiés par les physiciens, et pour lesquels ces derniers avaient prédit dans les années 1990 plusieurs exposants ou dimensions caractéristiques, avec l'idée sous-jacente que ces modèles jouissent de la symétrie conforme (invariance par rapport aux transformations conformes – transformations qui conservent localement les angles, mais pas forcément les distances) lorsque le pas du réseau tend vers 0.

Quant à Cédric Villani, une médaille Fields lui a été décernée « pour ses démonstrations de l'amortissement de Landau non linéaire et de la convergence vers l'équilibre de l'équation de Boltzmann ». Cette équation de la physique statistique décrit l'évolution d'un gaz peu dense. C. Villani s'est notamment intéressé au cas d'un gaz où existent des interactions à longue portée, par exemple quand les particules sont chargées électriquement (un plasma). L'un de ses nombreux résultats concerne la vitesse de convergence vers l'équilibre lorsque le gaz est initialement très éloigné. L'amortissement de Landau est un phénomène défini par le physicien russe Lev Landau en 1946, qui correspond à un transfert d'énergie des champs électromagnétiques créés par les particules chargées du

plasma vers les électrons de ce gaz. Landau avait prouvé sur une version linéaire et simplifiée de l'équation de Vlasov-Poisson, l'équivalent pour les plasmas de l'équation de Boltzmann, que cet amortissement mène le plasma à l'équilibre. L'année dernière, C. Villani et Clément Mouhot ont réussi à prouver sur la version complète, non linéaire, de l'équation de Vlasov-Poisson que Landau avait raison.

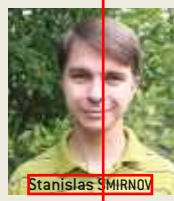
→ Maurice Mashaal et Loïc Mangin



Elon LINDENSTRAUSS



NGÔ Bao CHÂU



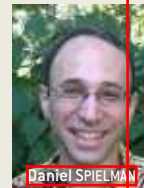
Stanislas SMIRNOV



Cédric VILLANI

Le prix Nevanlinna

Ce prix, attribué à un chercheur ayant fortement contribué aux aspects mathématiques de l'informatique, va à l'Américain Daniel Spielman, de l'Université Yale, dont les travaux ont porté sur la « programmation linéaire » et la théorie du codage, deux domaines ayant un grand nombre d'applications, le premier en recherche opérationnelle, le second en télécommunications et en informatique.



Daniel SPIELMAN

Le prix Gauss

Créé en 2006, ce prix récompense des mathématiciens dont l'œuvre a influé sur d'autres domaines tels que la technologie, la finance, voire la vie quotidienne. Il va cette année à Yves Meyer, professeur émérite à l'École normale supérieure de Cachan, pour « ses contributions fondamentales en théorie des nombres, en théorie des opérateurs et en analyse harmonique, ainsi que pour son rôle central dans le développement des ondelettes et de l'analyse multirésolution ». Les ondelettes sont une classe de fonctions « élémentaires » en lesquelles on peut décomposer des fonctions à variations brutales. Elles sont aujourd'hui au cœur de nombreuses techniques de traitement du signal et de compression de sons ou d'images, notamment la norme JPEG 2000.



Yves MEYER

La médaille Chern

À partir de cette année, un prix en l'honneur du mathématicien chinois Shiing-Shen Chern (1911-2004) distingue un individu, sans limite d'âge, dont les contributions mathématiques ont été exceptionnelles. Le premier lauréat est Louis Nirenberg, d'origine canadienne, distingué « pour son rôle dans la formulation de la théorie moderne des équations aux dérivées partielles non linéaires de type elliptique et pour avoir été le mentor de nombreux étudiants et postdoctorants dans ce domaine ». L. Nirenberg, âgé aujourd'hui de 85 ans, a fait toute sa carrière à l'Institut Courant de sciences mathématiques de l'Université de New York, institut qui a joué un grand rôle dans le développement des mathématiques appliquées au XX^e siècle.



Louis NIRENBERG



Plus de détails sur
www.pourlascience.fr

Médecine

Effets secondaires décodés ?

Le cisplatine est un agent anticancéreux utilisé contre diverses tumeurs (rein, testicules, ovaires, etc.). Administré par voie intraveineuse, il pénètre dans les cellules et forme des ponts dans la molécule d'ADN, ce qui en interdit la réplication et la transcription, et déclenche des mécanismes d'autodestruction. Les cellules qui se divisent rapidement – les cellules tumorales – sont les plus sujettes à la mort induite par ce composé, ce qui explique son efficacité. Malheureusement, le cisplatine et les anticancéreux de la même famille déclenchent parfois des effets secondaires qui obligent à interrompre le traitement. Il s'agit surtout d'effets neurologiques, tels que des sensations douloureuses, des troubles de la perception, ou encore de l'équilibre. Au Laboratoire Transport ionique, aspects normaux et pathologiques de l'Université de Nice-Sophia Antipolis (UMR 6097), nous venons de mettre en évidence un nouveau mode d'action du cisplatine qui expliquerait ces effets secondaires.

Indépendamment de son action sur l'ADN, le cisplatine modifie la fluidité et l'architecture des membranes cellulaires. Or des canaux ioniques – notamment les canaux sensibles à la pression – sont insérés dans ces membranes. Quand la tension ou la fluidité de la membrane changent, ces canaux ioniques tendent à se figer dans une position donnée. Nous avons montré que le cisplatine bloque notamment des canaux potassium sensibles à la pression en position fermée. Cette configuration rend les cellules hyperexcitables : il suffit d'un signal beaucoup plus faible pour les activer. C'est ainsi que les terminaisons nerveuses situées sous la peau, par exemple, deviennent hypersensibles. Ces résultats sont d'autant plus intéressants que l'on dispose, par ailleurs, de molécules qui régulent l'ouverture et la fermeture des canaux ioniques, à potassium notamment. On peut imaginer combiner ce puissant anticancéreux et ces molécules qui inhiberaient ses effets indésirables.

→ Laurent Counillon

N. Milosavljevic et al., *Cancer Research*, vol. 70(19), 2010

Physique

Une microseringue optique

Des bulles apparaissent là où les conditions locales de température et de pression franchissent le seuil d'ébullition d'un liquide. Georgy Sankin et deux collègues de l'Université Duke, en Caroline du Nord, ont exploité ce phénomène, nommé cavitation, pour perforer une cellule. Les physiciens ont focalisé les faisceaux de deux lasers à impulsions en deux points distants de 40 micromètres, tout près d'une cellule de rat placée dans une solution saline teintée. La première impulsion laser crée une surpression au voisinage de la cellule et, par là, une bulle de cavitation. Elle croît jusqu'à 50 micromètres de diamètre en environ quatre microsecondes avant de commencer à s'effondrer. À ce moment arrive la seconde impulsion laser, qui crée une seconde bulle. Les interactions des surfaces des deux bulles créent alors un microjet de liquide vers la cellule, qui perce sa membrane. Selon l'angle de visée et la proximité des foyers et de la membrane, le trou mesure de 0,2 à 2 micromètres. Quelques dizaines de secondes après la perforation, la teinte de la solution a complètement envahi la cellule. Un dispositif pour micro-injections cellulaires ?

→ F. S.

G. N. Sankin et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 107, 078101, 2010

Astrophysique

L'activité magnétique d'une étoile révélée

Un cycle d'activité magnétique analogue à celui du Soleil a été détecté, pour la première fois, par astérosismologie.

Tels de gigantesques tambours célestes, la surface des étoiles vibre sous l'effet des ondes sismiques qui les traversent. Sur le modèle de la sismologie, qui a permis de sonder l'intérieur de la Terre, l'observation de ces vibrations stellaires, ou astérosismologie, nous renseigne sur la structure interne des étoiles.

Une équipe internationale conduite par Rafael Garcia, du CEA, vient de mettre en évidence, pour la première fois par cette méthode, un cycle d'activité magnétique similaire à celui du Soleil dans une étoile distante de 100 années-lumière.

Pour ce faire, les astronomes ont analysé 187 jours durant les variations de luminosité de HD49933, étoile 20 pour cent plus massive que le Soleil et plus chaude, avec le satellite franco-européen CoRoT. Outre détecter des exoplanètes, cet instrument photométrique, c'est-à-dire conçu pour détecter de minuscules variations de luminosité, est aussi dédié à l'astérosismologie.

Les modes d'oscillation acoustique d'une étoile (ou modes p , engendrés par la pression du gaz)

se traduisent en effet par des mouvements oscillants d'une période de quelques minutes à sa surface, ce qui induit des variations locales de pression, donc de température et *in fine* de luminosité. CoRoT mesure la variation d'intensité lumineuse globale de l'étoile.

Les astronomes ont constaté que la fréquence et l'amplitude des modes p de l'étoile HD49933 varient avec une périodicité d'environ 120 jours. En outre, l'amplitude des modes décroît lorsque leur fréquence augmente, exactement comme on l'observe pour le Soleil au cours de son cycle magnétique.

Ces variations seraient donc la marque de l'évolution de l'activité magnétique de l'étoile, qui modifie sa structure et donc ses modes de vibration. Son cycle magnétique est environ 20 fois plus rapide que celui du Soleil (d'une durée de 11 ans). Bien que de l'activité magnétique ait déjà été observée dans certaines étoiles par spectroscopie, c'est la première fois qu'elle l'est par sismologie stellaire.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

Science, vol. 329, p. 1032, 2010



Vue d'artiste du satellite CoRoT observant les variations de luminosité d'une étoile de type solaire.

Astronomie

Un système à sept planètes

Avec ses huit planètes, notre Système solaire est le système planétaire le plus riche que l'on connaisse. Christophe Lovis, de l'Observatoire de Genève, et ses collègues en ont découvert un qui s'en approche : il contient au moins cinq planètes, et probablement deux autres, dont l'une ayant une masse proche de celle de la Terre. Les données du spectrographe HARPS indiquent de façon claire la présence de cinq planètes du type de Neptune (13 à 25 masses terrestres, avec des périodes de 6 à 600 jours) autour de l'étoile HD 10180. L'analyse suggère aussi la présence d'une planète semblable à Saturne (65 masses terrestres pour une période de 2200 jours), et d'un objet de 1,4 masse terrestre collé à l'étoile (période de 28,3 heures), ce qui en ferait l'exoplanète la plus légère jamais découverte.

Jusqu'ici, on connaissait 15 systèmes de trois planètes ou plus, le record étant 55 Cancris, avec cinq planètes. HD 10180 fournit un modèle riche pour étudier la dynamique des systèmes planétaires. Des simulations numériques ont ainsi montré qu'il serait stable.

→ Ph. R.-G.

Ch. Lovis et al., *Astronomy & Astrophysics*, à paraître

Neurobiologie

Le cœur au rythme d'un laser

Michael Jenkins, de l'Université Case Western Reserve, et des collègues ont mis au point une méthode optique, non invasive, pour moduler *in vivo* le rythme cardiaque d'un embryon de caille. En se fondant sur des travaux plus anciens qui avaient montré une influence de la lumière sur les cellules cardiaques, M. Jenkins et ses collègues ont pointé une diode laser infrarouge sur le cœur d'embryons de cailles âgés de 40 heures et mesurant moins de deux millimètres. Ils ont noté que chaque impulsion laser provoque un battement cardiaque. De plus, le rythme cardiaque se cale sur la fréquence des impulsions. Grâce à cette méthode, on peut tripler le rythme cardiaque. Les prémices d'un pacemaker optique ? Il ne s'agit pour l'instant que de recherche fondamentale, et le mécanisme en jeu reste à préciser. La lumière laser créerait un gradient de température dans les tissus excités. Cela provoquerait l'ouverture de canaux ioniques et la dépolarisation des membranes cellulaires, et donc l'apparition d'un potentiel d'action au niveau des cellules cardiaques.

→ Emilie Auvrouin

M. Jenkins et al., *Nature Photonics*, en ligne, 15 août 2010

Biologie cellulaire

La mémoire des muscles

Les muscles garderaient une trace, *via* le nombre de noyaux cellulaires, des entraînements passés.

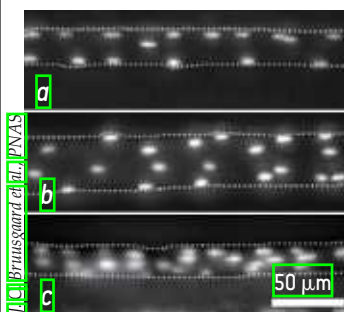
Pourquoi recouvre-t-on plus vite sa force musculaire lorsqu'on s'est déjà entraîné auparavant ? On privilégiait l'hypothèse d'une mémoire de l'entraînement au niveau du système nerveux central. Des chercheurs de l'Université d'Oslo remettent cette idée en cause. En provoquant des périodes d'inactivité et d'activité musculaire intense chez la souris et en suivant l'évolution des cellules musculaires par vidéomicroscopie, ils ont montré que les noyaux de ces cellules gardent, par leur nombre, la mémoire d'un entraînement physique antérieur.

Les longues cellules musculaires des muscles squelettiques ont plusieurs noyaux. Leur épaisseur augmente lorsque le muscle est soumis à l'exercice, et l'on pensait que le nombre de noyaux s'ajustait à leur taille pour répondre à leurs besoins. Le mécanisme serait le suivant : activées par un signal, des cellules souches voisines se mul-

tiplieraient et fusionneraient avec les cellules musculaires pour leur donner leurs noyaux ; en cas d'atrophie musculaire, le surplus de noyaux s'autodétruirait.

Les biologistes ont confirmé que lors d'un entraînement physique, le recrutement de noyaux a bien lieu de cette façon. En revanche, ce recrutement précède l'hypertrophie musculaire, et le nombre de noyaux ne diminue pas lorsqu'on arrête l'exercice, même quand le muscle s'atrophie : ils se tassent dans les cellules amincies. Disposant d'un nombre suffisant de noyaux, les cellules musculaires regonfleraient plus rapidement lors d'un nouvel entraînement. Ces travaux pourraient notamment fournir une piste pour mieux comprendre l'impact de l'exercice physique dans les maladies musculaires.

→ Marie-Neige Cordonnier

J. C. Bruusgaard et al., *PNAS*, en ligne, 16 août 2010

Chez une souris entraînée durant 14 jours, le nombre de noyaux et le diamètre des cellules musculaires (a) augmente (b). Après 14 jours de repos, le diamètre des cellules musculaires a diminué, mais le nombre de noyaux est resté constant (c).

DERNIÈRE minute ...

DES ULTRAVIOLETS POUR FAIRE DE L'EAU

D'où vient l'eau autour la géante rouge IRC+1021 ? L'enveloppe de cette étoile en fin de vie est en effet riche en carbone, qui fixe l'oxygène et empêche ainsi la formation d'eau. Mais de nouvelles mesures du télescope *Herschel* confirment la présence d'eau à une température de 200 à 800 °C dans les régions internes de l'enveloppe. Les molécules de monoxyde de car-

bone y auraient été cassées par le rayonnement ultraviolet des étoiles voisines, libérant ainsi l'oxygène requis pour la synthèse de l'eau.

NETTOYAGE ÉLECTRIQUE DE NANOTUBES

L'équipe de Richard Masel, à l'Université de l'Illinois aux États-Unis, a montré que le passage d'un courant électrique intense à travers un nanotube de carbone permet de se débarrasser des molé-

cules organiques accumulées à sa surface. Comme le procédé chauffe le nanotube de moins de quatre degrés, il ne le perturbe pas ; il permettrait donc de réutiliser à volonté des nanotubes servant de détecteurs de produits chimiques.



Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur

www.pourlascience.fr

Assurance vie : alliez performance et sécurité !

L'assurance vie demeure le produit d'épargne préféré des Français. Dans la multitude des contrats présents sur le marché, la GMF se distingue par des solutions offrant rendement et sécurité.



La crise financière n'entame pas la confiance des Français dans l'assurance vie ! Les cotisations collectées au 1^{er} semestre 2010 par la GMF sont en hausse de 17% par rapport à la même période de l'année précédente. Rien d'étonnant à cela lorsqu'on constate les taux servis par la GMF en 2009 et qui sont parmi les meilleurs du marché. Le rendement de ses contrats et supports d'assurance vie en euros a atteint 4,15%⁽¹⁾. Un taux non seulement supérieur à la moyenne du marché, qui n'excède pas 3,70%⁽²⁾

en 2009, mais aussi beaucoup plus intéressant que ceux désormais offerts par les livrets d'épargne traditionnels. Ainsi, alors que ces livrets classiques garantissent à l'épargnant la sécurité contre un faible rendement, le contrat Altinéo de la GMF, lui, offre sécurité et performance. Vous profitez d'un taux minimum garanti chaque année, les intérêts vous sont définitivement acquis et génèrent eux-mêmes d'autres intérêts. De plus, vous investissez sans plafond, tout en profitant d'une fiscalité privilégiée. Profitez-en !

UNE PERFORMANCE RÉCOMPENSÉE

Depuis 2000, le contrat d'assurance vie en euros Compte Libre Croissance – aujourd'hui remplacé par Altinéo, un produit qui offre des caractéristiques et un niveau de performance similaires – a offert à l'épargnant un rendement moyen de 4,48%⁽³⁾ par an, soit plus de 36,84%⁽⁴⁾ sur 8 ans. C'est pour distinguer notamment la régularité de ses performances que les experts des Dossiers de l'Épargne ont, en 2010, décerné pour la troisième année consécutive le label d'excellence à Altinéo.

Didier Ledeur, Directeur Général de la GMF VIE

« Une expertise qui profite directement aux épargnants »

« La GMF propose une large gamme de produits d'assurance vie, d'épargne et de placement depuis maintenant plus de 30 ans. C'est cette expertise, constituée au fil des ans, qui lui permet aujourd'hui d'afficher d'excellents résultats, et ce malgré un environnement économique et boursier plus difficile. L'épargnant en bénéficie directement, comme il tire profit des valeurs mutualistes qui animent au quotidien l'entreprise : refus des effets d'annonce, absence de taux « boostés » à court terme pour recruter de nouveaux clients... Sans oublier une solide santé financière, un élément indispensable dans le contexte actuel. »

Pour en savoir plus :
appelez le 0 820 809 809
(0,12 € TTC/mn) ou consultez
le site www.gmf.fr



Assurément Humain

(1) frais de gestion déduits, avant prélèvements sociaux.

(2) source : Fédération Française des Sociétés d'Assurances, estimation au 23.6.10.

(3) taux de rendement annualisé du 31.12.01 au 31.12.09, frais de gestion déduits et avant prélèvements sociaux.

(4) taux de rendement du 31.12.01 au 31.12.09, frais de gestion et prélèvements sociaux déduits.

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ UN PEPTIDE DÉCLENCHEUR

La « maladie cœliaque » est une intolérance au gluten, une protéine du blé, et à deux autres protéines semblables, de l'orge et du seigle. La consommation d'aliments contenant ces protéines provoque chez le patient une réaction immunitaire qui endommage les villosités et les cellules de l'intestin. Le patient souffre d'une mauvaise absorption des nutriments, ce qui peut avoir de graves conséquences (voir *L'intolérance au gluten*, *Pour la Science*, février 2010, <http://tinyurl.com/plsoerb388>). Bien que la maladie ait plusieurs causes, l'identification des éléments déclencheurs de la réaction immunitaire est essentielle pour mieux traiter les patients, qui n'ont pour seul remède de ne pas consommer de gluten. Or des biologistes australiens et anglais viennent de trouver un peptide – un fragment de protéine – qui déclenche la maladie (*Science Translational Medicine*, juillet 2010). En étudiant la réaction immunitaire de 200 patients ayant consommé du blé, de l'orge ou du seigle pendant trois jours, les chercheurs ont découvert un peptide commun aux trois céréales qui stimule le système immunitaire. En outre, ils ont mis en évidence les cellules particulières du système immunitaire, des lymphocytes T, qui causent les dégâts.

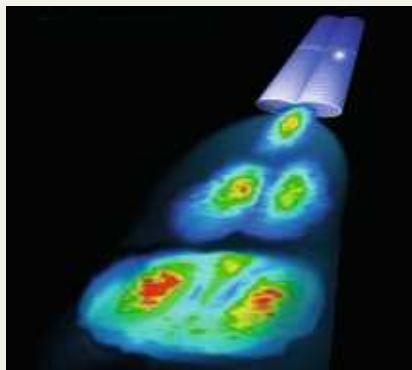
→ INTRIUER DES PHOTONS

L'ordinateur et la téléportation quantiques ne seront réalisables que si l'on maîtrise un intrigant phénomène quantique : l'intrication. Deux photons sont intriqués si les propriétés de l'un dépendent de celles de l'autre, quelle que soit la distance les séparant (voir *Domestiquer l'intrication quantique*, *Pour la Science*, novembre 2007, <http://tinyurl.com/plsoerb361>). Pour fabriquer ces photons intriqués, les chercheurs utilisent des dispositifs dont la brillance est faible : moins d'une impulsion sur 100 contient une paire de photons intriqués. Une équipe française a mis au point une source lumineuse de photons intriqués 20 fois plus brillante que les

→ LE GÈNE DE LA RESPIRATION À LA NAISSANCE

La mort subite du nourrisson est une maladie déroutante ; sans raison apparente, un nourrisson en bonne santé s'arrête de respirer pendant son sommeil (voir *Prévenir la mort subite du nourrisson*, *Pour la Science*, mai 2010, <http://tinyurl.com/plsoerb391>). Des anomalies des systèmes respiratoires et cardiaques et des mécanismes d'éveil seraient impliqués. Mais les recherches continuent pour mieux comprendre cette pathologie et améliorer les règles de prévention. Des chercheurs parisiens et marseillais viennent d'identifier un gène indispensable à la respiration, et notamment au déclenchement de la première bouffée d'air du nouveau-né (*The Journal of Neuroscience*, juillet 2010). Ce gène code une protéine nommée TSHZ3, qui joue un rôle essentiel dans l'activité rythmique des neurones d'une région du tronc cérébral. Or cette région régule les mouvements respiratoires automatiques des nouveau-nés. Les souris génétiquement modifiées pour ne pas exprimer cette protéine mettent au monde des souriceaux qui n'arrivent pas à respirer et meurent en quelques minutes. Reste à préciser l'implication de ce gène dans le syndrome de mort subite du nourrisson et dans d'autres pathologies respiratoires de l'homme.

systèmes existants (*Nature*, juillet 2010). Pour ce faire, ils ont placé une « boîte » quantique – une nanostructure de matériau semi-conducteur émettant des paires de photons intriqués à partir de la recombinaison de deux paires électron-trou – dans une structure dite de « molécule » photonique. Celle-ci correspond à deux cavités optiques couplées qui collectent les photons efficacement. Cette source fonctionne avec un débit d'une paire de photons intriqués toutes les huit impulsions. Et les chercheurs espèrent atteindre une paire par impulsion ! De quoi augmenter le débit des communications quantiques...



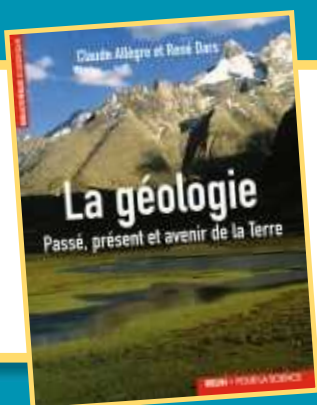
Ces deux piliers (en haut) de taille micrométrique – formant une « molécule photonique » – contiennent la boîte quantique (point lumineux blanc) qui émet des paires de photons intriqués (dont on voit les diagrammes de rayonnement).

→ LA FIN DES CORAUX ?

Les récifs coralliens sont en danger : non seulement ils sont exposés à des substances chimiques toxiques et sont souvent détruits, mais ils subissent aussi l'acidification des océans due à la dissolution du dioxyde de carbone atmosphérique. Ce phénomène engendre une décomposition du squelette de carbonate de calcium des coraux (voir *L'acidification des océans : l'écosystème menacé*, *Pour la Science*, mai 2006, <http://tinyurl.com/plsoerb343>). Et ce n'est pas tout : les coraux souffrent aussi de la chaleur. Sous les tropiques, la température moyenne de l'eau a augmenté de plus d'un demi-degré en 40 ans. Des chercheurs américains suggèrent que toute croissance corallienne pourrait cesser d'ici 2070 si le réchauffement actuel se poursuit (*Science*, juillet 2010). Grâce à des techniques d'imagerie en trois dimensions, ils ont observé le corail *Diploastrea heliophora* en mer Rouge et ont constaté que la croissance du squelette des colonies saines avait diminué de 30 pour cent depuis 1998. Mais les coraux ont déjà réussi à se remettre d'un court épisode de chaleur au début des années 1940 : il est encore possible de les sauver si le réchauffement ralentit en mer Rouge.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

Notre sélection de livres à offrir ou à s'offrir



Aujourd'hui, la géologie, c'est la théorie de la tectonique des plaques, mais c'est aussi l'histoire de la Terre, son économie, ses ressources (pétrole, minerais, eau), ses humeurs (catastrophes naturelles), etc. Le passé, le présent et l'avenir de la Terre ne peuvent être examinés que par la géologie.

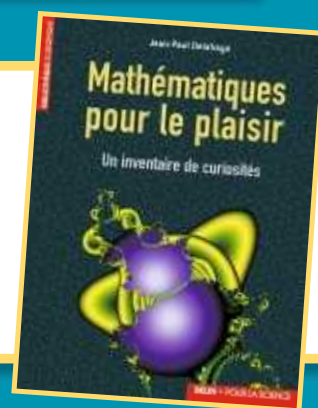
Découvrez cet ouvrage très illustré rédigé par Claude Allègre, ancien directeur de l'Institut de physique du Globe, et son collègue et ami René Dars.

075102 • 304 pages • 35 euros

Les mathématiques sont faciles et s'y adonner est un plaisir. Les arts géométriques, les jeux de cartes, les jeux avec des dominos ou des damiers, la vie sociale et politique et ses subtiles stratégies, toutes ces activités sont mathématiques et souvent procurent des satisfactions... même à ceux qui clament ne pas aimer les mathématiques et y être « nuls ».

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.

075104 • 208 pages • 25 euros



Une plante plus rapide qu'une mouche, un tuyau qui parle, une cape qui rend invisible, etc. La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus.

Passionnés de physique et curieux de sciences, Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse dans un langage accessible, simple et imagé. Retrouvez les meilleures de leurs chroniques parues dans *Pour la Science*.

Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

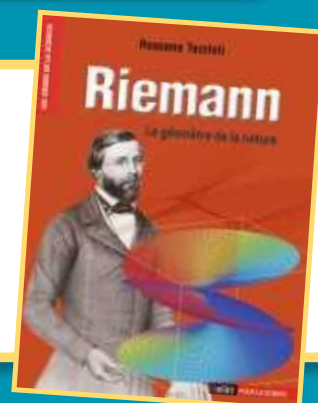
075105 • 160 pages • 22 euros

Riemann (1826-1866) rêvait d'une théorie mathématique qui décrirait toutes les lois de la Nature. Timide et réservé dans la vie, il était audacieux lorsque son esprit s'emparait d'idées inattendues et qu'il s'aventurait dans la physique, la philosophie naturelle et même la psychologie.

Ses travaux ont permis de dépasser la géométrie d'Euclide qui prévalait depuis l'Antiquité et d'ouvrir la voie à la relativité selon Albert Einstein le siècle suivant.

Ce livre nous fait suivre son itinéraire intellectuel dans l'Europe tourmentée du XIX^e siècle.

075106 • 160 pages • 19 euros



POINT DE VUE

Mathématiques françaises : un avenir à assurer

Une nouvelle fois, l'excellence de la recherche française en mathématiques est mise en exergue par les prix de 2010, notamment les médailles Fields. Cependant, des inquiétudes pèsent sur sa pérennité.

Patrick GÉRARD

Les médailles Fields et le prix Gauss décernés le 19 août mettent à l'honneur trois mathématiciens français (Ngô Bao Châu, Cédric Villani et Yves Meyer, voir les actualités page 8). Ces distinctions illustrent une fois de plus l'excellence de la recherche mathématique en France. À juste titre, tout le monde dans le pays s'en est félicité, y compris dans les cercles du pouvoir. Mais il n'est pas sûr que tout le monde soit conscient de ce qui a construit cette excellence. Et il n'est pas sûr non plus que les conditions qui la favorisent soient durables...

Revenons d'abord sur la qualité des mathématiques françaises. Elle ne se mesure pas uniquement à l'aune des prix de cette année. Depuis leur création, en 1936, 11 médailles Fields sur 52 sont allées à des mathématiciens français ou liés à la France, ce qui place ce pays au deuxième rang, derrière les États-Unis (13 médailles), devant l'Union soviétique/Russie (9 médailles) et loin devant les autres.

Un autre critère cher à notre communauté est le nombre de conférenciers invités au Congrès international des mathématiciens, tenu tous les quatre ans. Avec 26 conférenciers invités au dernier congrès, à Hyderabad en Inde, la France est le pays le plus représenté après les États-Unis.

Deux autres indices de la santé des mathématiques françaises sont leur grande diversité, la plupart des domaines de la discipline étant représentés, ainsi qu'une répartition géographique équilibrée des grands centres de recherche – même si la région parisienne concentre un grand nombre de laboratoires.

D'où provient l'excellence française en mathématiques ? On peut invoquer plusieurs facteurs. L'un d'eux est de nature historique et culturelle, le goût français pour l'abstraction et pour les mathématiques étant une tradition qui remonte au XVIII^e siècle au moins.

Un autre facteur est que le nombre de mathématiciens français (environ 4 000 dans le secteur académique) est suffisamment élevé pour constituer une « masse critique » dans plusieurs grandes villes du pays, dont

LA STRUCTURATION
de la communauté mathématique française joue un rôle clef dans son dynamisme.

les universités abritent des laboratoires de mathématiques de haut niveau. Cette situation favorise la circulation des idées et des interactions fructueuses ; elle permet aussi d'offrir à de jeunes chercheurs des postes en dehors de la région parisienne, dans les régions où ils souhaitent vivre. Et elle s'accompagne d'un autre élément dynamisant : l'absence délibérée de recrutements locaux.

La structuration de la communauté mathématique française joue un rôle clef dans son dynamisme. En mathématiques, les universités et le CNRS collaborent très bien. La plupart des mathématiciens sont des enseignants-chercheurs des universités, et l'on compte environ 400 chercheurs employés par le CNRS. La coexistence des activités d'enseignement et de recherche est très importante pour la vitalité de la discipline, en particulier pour la formation doctorale. Or tous les

laboratoires de mathématiques du CNRS sont des unités mixtes, associées en général à une université. La circulation entre les deux structures est courante et joue un rôle extrêmement bénéfique.

Par exemple, de jeunes mathématiciens brillants ont la possibilité de débiter leur carrière au CNRS très vite après la thèse, afin de se consacrer entièrement à la recherche durant leurs années souvent les plus fécondes, avant de poursuivre leur carrière à l'université. Là, ils auront aussi l'occasion de former des doctorants, d'animer des équipes de recherche et bien sûr d'enseigner à tous les niveaux. De plus, le CNRS propose des délégations aux enseignants de l'université, qui leur permettent d'être déchargés de l'enseignement durant six mois à un an – des incitations à la recherche qu'il faut continuer à développer.

Bien sûr, la formation joue aussi son rôle, et en premier lieu la formation doctorale, qui s'effectue presque toujours dans les universités. Celles-ci recrutent leurs doctorants soit parmi leurs meilleurs étudiants, soit parmi d'anciens élèves des classes préparatoires aux Grandes écoles. Le système des classes préparatoires, typiquement français, permet aux élèves d'acquiescer un rythme et une méthode de travail performants, et les prépare notamment aux concours d'entrée aux Écoles normales supérieures et à l'École polytechnique, établissements privilégiés pour ceux qui, après un doctorat, veulent faire des mathématiques leur métier.

Le dynamisme de la recherche mathématique en France est-il pérenne ? Ce n'est pas sûr. Le système des classes prépara-

toires et des Grandes écoles tend à sélectionner des esprits d'un certain type (scolaire par exemple), au détriment d'autres, notamment dans la population féminine. En outre, il draine vers les écoles d'ingénieurs une grande partie des jeunes scientifiques brillants d'une classe d'âge. Une fois entrés dans une école autre que celles citées, ils auront souvent du mal à s'orienter vers la recherche en mathématiques, les passerelles entre le monde universitaire et celui des écoles d'ingénieurs étant insuffisantes.

Aujourd'hui, on constate un réel fossé entre la recherche fondamentale en mathématiques et les écoles d'ingénieurs. Ce fossé nuit à la capacité d'innovation des entreprises et entretient l'infériorité du statut social des docteurs en mathématiques par rapport à celui des ingénieurs, ce qui contribue à réduire l'attractivité du métier de mathématicien.

Comblant ce fossé tout en préservant l'indépendance de la recherche fondamentale est certainement l'un des grands enjeux à venir pour notre pays.

D'autres inquiétudes ont trait à l'autonomie des universités, avec laquelle une grande partie des moyens d'un laboratoire seront attribués par un arbitrage fait au sein de son université, et non au niveau national. Or à un niveau local, des disciplines comme les mathématiques, minoritaires et moins immédiatement liées à des enjeux financiers, industriels ou sociaux, ont plus de mal à défendre leurs intérêts, et les arbitrages risquent de se faire souvent à leurs dépens. Il est donc essentiel que les présidents des universités et leurs conseils sachent reconnaître la spécificité des mathématiques parmi les autres disciplines, et préserver ainsi la qualité de leurs laboratoires.

Enfin, l'enseignement secondaire assurera-t-il un vivier de recrutement suffisant en mathématiques ? Les échos provenant de nombreux enseignants ne sont, sur ce point, guère rassurants, malgré leurs efforts et ceux des associations (*Kangourou*, *Math.en.Jeans*, *Animath*...) qui travaillent à donner aux jeunes une image des mathématiques moins scolaire et plus ouverte sur la créativité.

La qualité de la recherche mathématique est l'une des grandes richesses françaises. Sachons la préserver et la cultiver.

Patrick GERARD, professeur à l'Université de Paris-Sud et membre de l'Institut universitaire de France, dirige le Laboratoire de mathématiques d'Orsay (UMR 8628 du CNRS).

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

ÉCONOMIE

Voulant favoriser la concurrence...

... la Commission européenne a autorisé l'ouverture des marchés boursiers. Conséquence : les dispositifs algorithmiques conçus par de brillants esprits scientifiques pervertissent le marché.

Ivar EKELAND

Où acheter des actions aujourd'hui ? Le naïf ira sur une des Bourses classiques, *Euronext* ou le *London Stock Exchange*. Ce qu'il ne sait pas, c'est que depuis une directive européenne de 2007, les vendeurs sont en fait des algorithmes ultrarapides qui structurent leur offre et modifient leur prix pour extraire l'argent du client. Ils proposent quelques actions à un prix d'appel, davantage à un prix intermédiaire, et beaucoup à un prix élevé. Si le client a besoin de 1 000 actions, il est devant un dilemme. Ou bien il les achète en bloc et paye le prix fort. Ou bien il ne prend que les premières, et il attend que les prix des autres baissent. Mais

ce faisant, il a révélé sa présence, tel le poisson qui a tâté l'appât. Comme le pêcheur qui ferre sa prise, le vendeur augmente immédia-



tement ses prix, et il faudra attendre que la patience du vendeur grippe-sous soit épuisée pour que les cours de ces actions retombent.

À rivaliser de ruse et de patience avec un algorithme, on perd le plus souvent. Le résultat, c'est que plus on achète, plus on paie cher : les gros investisseurs payent plus que les petits. Horreur ! Que l'on plume les petits investisseurs, c'est la règle du jeu, mais que l'on plume les gros, voilà de quoi émouvoir le régulateur. La Commission européenne a donc suscité l'ouverture de marchés parallèles, connus sous le nom de *dark pools*, que je traduirai volontiers par « marigots obscurs ».

Un *dark pool* est essentiellement un guichet ouvert sur un marché financier soumis

aux règles habituelles de transparence : publicité des offres d'achat et de vente, ainsi que des transactions. Le *dark pool*, lui, n'est pas soumis à ces règles : il ne rend publiques ni les offres d'achat ni les offres de vente. Si je passe un ordre d'achat de 1 000 actions, il y a deux possibilités. Ou bien il n'y a pas d'ordre de vente, et on me répond que mon ordre n'a pas été exécuté. Ou bien il y a un ordre de vente, disons pour 500 actions, et on me répond que mon ordre a été exécuté pour moitié. Pour le reste, il faudra attendre qu'arrive un autre ordre de vente, à moins qu'entre-temps je ne décide de retirer mon ordre d'achat. Toutes les transactions se font au prix observé sur le marché de référence : par définition, c'est la moyenne entre le prix d'achat le plus bas et le prix de vente le plus haut.

L'avantage de ce dispositif, c'est qu'on ne peut plus structurer l'offre suivant le prix. L'investisseur qui achète 500 actions sur le *dark pool* les paie toutes au même prix : il échappe ainsi aux stratégies prédatrices

des vendeurs sur le marché ouvert. Ou du moins, c'est ce que pensait le régulateur dans sa profonde sagesse. Mais dès qu'il s'agit de gagner de l'argent, l'ingéniosité humaine est infinie, et bien vite les vendeurs ont appris à tirer parti de cette structure étrange où les transactions se font sur un marché suivant un prix déterminé sur un autre. La plus élémentaire est le « *pinging* » : le vendeur envoie sur le *dark pool* un ordre de vente pour une seule action. Si l'ordre n'est pas exécuté, il en est pour ses frais, qui ne sont pas bien élevés. S'il l'est, c'est qu'il y a un ordre d'achat, probablement pour un montant beaucoup plus élevé, et donc un poisson dans la mare, pardon, un acheteur potentiel. Le vendeur se gardera donc de proposer davantage sur le *dark pool*, au contraire il augmentera ses prix sur le marché ouvert, car le poisson sera bien forcé de venir mordre.

S'il soupçonne que le poisson est vraiment gros, le vendeur peut être plus vicieux. Si, par exemple, il pense que l'offre d'achat

dans le *dark pool* dépasse les 1 000 actions, il ira acheter (oui, acheter) 100 actions sur le marché ouvert, et immédiatement après passera un ordre de vente de 1 000 actions dans le *dark pool*. S'il a joué assez vite (tout cela se compte en millisecondes), son achat aura fait monter le prix sur le marché ouvert, qui est le prix de référence sur le *dark pool* : il aura ainsi fait monter le prix avant de vendre !

Voici désormais à quoi s'emploient les brillants esprits sortis de Polytechnique ou de Centrale. Ils seraient mieux employés à réfléchir sur la nécessité de nouveaux antibiotiques, le stockage de l'énergie, l'approvisionnement en eau potable, le changement climatique, la crise mondiale, la chute de la biodiversité. Mais ce ne sont pas des priorités que l'on entend dans le discours public. La Commission européenne, en créant cet immense casino, ne fait que refléter les ambitions de nos politiques. Vive la finance !

Ivar EKELAND est professeur d'économie.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'écoconception des appareils électroniques

Recycler les produits électroniques nécessite de les concevoir à cette fin.

Françoise BERTHOUD

Téléphones, ordinateurs, téléviseurs, caméscopes, lecteurs MP3, etc. : mis au rebut, ces objets deviennent des déchets électriques et électroniques (DEEE). Le monde en produit 40 millions de tonnes par an. D'ici 2020, les pays industrialisés en produiront 30 à 50 pour cent de plus, et la Chine, l'Inde ou l'Afrique du Sud trois à cinq fois plus qu'aujourd'hui !

Or les circuits électroniques contiennent des métaux ayant une valeur marchande (or, argent, palladium, platine, cuivre, alumi-

nium), mais aussi des substances plus ou moins toxiques : mercure, indium, plomb, cadmium, arsenic, beryllium, phtalates, halogènes, etc. Or à mesure que les DEEE s'accumulent, ces substances polluent l'environnement ; et les métaux, notamment utilisés par l'électronique, se raréfient. Que faire ?

Dans l'Union européenne, depuis la directive DEEE du 27 janvier 2003 (transcrite, en France, par le décret du 20 juillet 2005), les fabricants sont responsables de la collecte, de la dépollution et de la valorisation de ces déchets. Les consommateurs financent par-

tiellement cette filière par une écocontribution. Toutefois, un quart seulement des DEEE sont collectés en France, quelques pour cent pour les téléphones mobiles. D'autres pays industrialisés font mieux. Mais globalement, la majorité est conservée, jetée avec les ordures ménagères, ou exportée.

L'insuffisance de la collecte tient en grande partie à ce que ces appareils ne sont pas conçus pour être réutilisés ou valorisés en fin de vie. La séparation de leurs composants est complexe, coûteuse et nécessite des compétences et des équipements de haut niveau.

La diversité des éléments augmentant avec le nombre de fonctionnalités, le coût du recyclage devient vite trop élevé par rapport au bénéfice que l'on en retire.

En conséquence, bien que leur exportation soit proscrite par la Convention de Bâle sur les mouvements transfrontaliers des déchets dangereux (1994), de plus en plus de DEEE sont expédiés vers les pays d'Asie et d'Afrique. Là, dans des « filières informelles », des ouvriers les brûlent, les traitent

globalement dans ce sens, l'objectif étant de collecter 70 à 85 pour cent des DEEE et d'en recycler 50 à 75 pour cent d'ici 2016.

Un deuxième type de solution consiste à augmenter la part des appareils « écoconçus ». En France, d'après la loi issue du *Grenelle de l'environnement*, l'écocontribution diminuera pour les appareils bien conçus et moins polluants, et augmentera pour les autres. Elle doublera ainsi (passant de un à deux centimes) pour un téléphone portable sans chargeur universel. Toutefois, la différence de prix final sera invisible, et cette mesure risque donc d'être inefficace. Il faudrait que l'étiquette mentionne l'effort consenti par le constructeur pour orienter le choix des consommateurs.

À l'échelle européenne, il existe bien une loi censée favoriser l'écoconception des produits électriques et électroniques : la directive Écoconception pour les produits consommateurs d'énergie (EuP, 2005). Mais ses exigences sont tellement limitées – une faible consommation énergétique, essentiellement – qu'elle incite peu à créer des produits durables.

Une solution plus directe dépend des consommateurs professionnels, tels les entreprises et les organismes publics. Chacun d'eux peut exiger de ses fournisseurs des produits « écolabellisés » (par exemple, par le label EPEAT, Outil d'évaluation environnementale des produits électroniques), solides, durables et recyclables, vendus avec des garanties pluriannuelles. L'achat serait plus coûteux, mais rentable à long terme.

Cette option ne serait guère souhaitée par les consommateurs de nouveautés technologiques à bas prix, à moins que les associations de consommateurs n'exercent une pression sur les fabricants en faveur de produits écoconçus, mais néanmoins accessibles. En revanche, nous pouvons tous, d'ores et déjà, éviter de renouveler trop souvent nos appareils *high tech* : n'est-ce pas la façon la plus simple de diminuer les déchets électroniques ?

Françoise BERTHOUD, ingénieure de recherche en informatique au CNRS, est responsable du groupe de travail EcoInfo, à Grenoble.

<http://www.ecoinfo.cnrs.fr/>
<http://www.ban.org>
<http://ewasteguide.info/>

EXIGER DES APPAREILS solides, durables et recyclables.

à l'acide, etc. Mais ils ne récupèrent qu'une petite quantité de métaux, tout en polluant l'environnement et en s'exposant aux substances toxiques.

Simultanément, les ressources indispensables à la fabrication des produits de haute technologie, telles les terres rares, sont devenues un enjeu géopolitique planétaire, source de conflits. C'est le cas en République démocratique du Congo, avec l'exploitation du coltan, minerai dont on extrait le tantale, utilisé pour les téléphones portables.

On ne pourra résoudre ces problèmes qu'en recyclant plus efficacement et proprement les composants électroniques, et en concevant autrement les appareils. Il faut à la fois mieux organiser le recyclage et mieux réglementer pour inciter producteurs et consommateurs à favoriser les appareils peu polluants et recyclables.

Une première mesure, peu coûteuse et applicable partout, consisterait à démonter et réparer systématiquement les pièces constitutives des appareils, comme cela se fait déjà dans certains pays, tel le Pérou (87 pour cent des vieux ordinateurs importés y sont réparés). À l'autre bout de la chaîne, des usines dotées des dernières technologies récupéreraient les métaux et élimineraient les substances dangereuses des composants non réutilisés. Aujourd'hui, on sait, quand on s'en donne les moyens, recycler plus de 60 pour cent du poids des DEEE. Il serait possible, en consentant les investissements nécessaires, de généraliser cette performance et même de l'accroître. La révision en cours de la directive DEEE semble aller

IRD Éditions Institut de recherche pour le développement

Un éditeur pour le développement

Sociétés, environnements, santé
 N. VERRAZZAUCHI, M.-E. GILMAN, D. BURY
 364 p. 36 €

L'énergie dans le développement de la Nouvelle-Calédonie
 Y. LE BAH, E. FAUGÈRE, P. MENANTPAUL, B. MURTON, A. BLEDACKER, S. VEUJT
 472 p. 15 €

La dengue
 Annales des départements français d'Amérique
 R. CORINTTAU, B. PHILIPPON, A. YDIAKOMA
 208 p. 15 €

Le Rift est-africain
 B. HIRSCH, B. ROUSSEL
 424 p. 45 €

En vente dans toutes les librairies et par correspondance :
 IRD Diffusion
 32, av. Varagnat - F-93143 Bondy cedex
 Tél : 01 48 02 56 49 Fax : 01 48 02 79 09
 diffusion@ird.fr
www.ird.fr



Empreinte en spirale

VRAI OU FAUX

Les vrais jumeaux ont-ils les mêmes empreintes ?

Non. Car les empreintes digitales ne sont pas uniquement façonnées par les gènes : l'environnement in utero intervient aussi.

Clémence CARRON

En 1892, Francis Galton, cousin de Charles Darwin, calcula la probabilité que deux personnes aient les mêmes empreintes digitales. Elle est infinitésimale : une chance sur 64 milliards. Ces empreintes, nommées dermatoglyphes, sont utilisées à des fins d'identification depuis des millénaires. Dans les royaumes babyloniens comme en Chine antique, les empreintes digitales ou palmaires servaient de signature sur les documents officiels. On savait déjà que l'identité biométrique d'une personne réside dans ces dessins si particuliers. Mais les vrais jumeaux, qui ont le même patrimoine génétique, ont-ils les mêmes empreintes ?

L'agencement des empreintes digitales soulève un paradoxe : leur forme est spécifique d'un individu, mais elles se ressemblent beaucoup dans leurs structures. En effet, on définit trois motifs partagés par 95 pour cent de la population : la boucle (60 pour cent des cas), la spirale (30 pour cent des cas) et l'arche, plus rare (5 pour cent des cas). Les cinq pour cent restants appartiennent à une catégorie plus complexe d'agencements avec de multiples boucles.

Les dermatoglyphes se dessinent très tôt au cours du développement embryonnaire. L'extrémité des doigts s'individualise dès la septième semaine de gestation. Des « coussins » digitaux deviennent proéminents vers la 10^e semaine. C'est dans ces structures en forme de coussinet que s'établissent les sillons et les arêtes des empreintes digitales, entre la 10^e et la 16^e semaines. Ces sillons résultent d'une ondulation progressive de la lame basale de l'épiderme, la structure embryonnaire de soutien du futur épiderme. Les contraintes physiques engendrées dans

cette structure par les tissus qui se développent provoquent une réorganisation des couches cellulaires internes de l'épiderme en formation qui aboutissent à un plissement du tissu en surface. À 24 semaines, la géométrie des empreintes est fixée définitivement pour toute la vie de l'individu, et les seules déformations qui se produisent ensuite viennent de la croissance des doigts.

L'expression de gènes spécifiques guide la formation globale des structures digitales et la différenciation coordonnée des types cellulaires. Si les gènes sont les architectes des dermatoglyphes, alors les vrais jumeaux, dont le patrimoine génétique est identique, devraient avoir les mêmes empreintes...

Mais ce n'est pas le cas. Bien que la comparaison des empreintes de deux vrais jumeaux révèle une grande similarité, une analyse plus poussée montre des disparités.

Des pressions externes

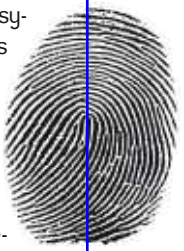
En fait, le facteur déterminant le modelage des empreintes est l'environnement auquel est exposé le fœtus au cours du développement des doigts. Les forces de frottement des doigts en cours de formation sur divers éléments, tels le liquide amniotique et les structures utérines, modifient le développement des empreintes. Or ces contraintes externes sont différentes d'un fœtus à l'autre.

De même, la formation osseuse sous-jacente (la taille et la vitesse de croissance de l'os), le suçage du pouce *in utero* et les mouvements des mains modèlent l'épiderme. L'influence environnementale sur la formation des empreintes ne se limite pas à ce qui se produit dans la cavité utérine ; l'environnement extérieur joue un rôle majeur. On a

montré que, quand la mère subit un stress environnemental, la formation des dermatoglyphes peut être altérée, via une cascade de signaux reposant sur des réactions biochimiques transmises de la mère au fœtus et qui peuvent modifier l'expression des gènes.

Par exemple, plusieurs études suggèrent que des stress chimiques (l'exposition à des agents toxiques, l'alcool), biologiques (des infections virales ou bactériennes) ou physiologiques (l'hypertension, le manque d'oxygène), mais aussi psychologiques, augmentent l'altération des dessins digitaux (interruption des crêtes, arête dédoublée).

À ce titre, les empreintes digitales peuvent être considérées comme des marques indélébiles de ce qui s'est produit au cours du développement entre la 10^e et la 24^e semaines de gestation. Cette période intéresse les spécialistes du développement cérébral, car c'est à ce moment-là que migrent les neurones qui vont former le cortex cérébral. Or, dans certaines pathologies psychiatriques telle la schizophrénie, des études ont montré qu'il existe un lien entre les anomalies des empreintes et une susceptibilité accrue vis-à-vis de la maladie. Pour de vrais jumeaux, on a montré que l'un des deux souffrant de schizophrénie présentait des empreintes digitales anormales alors que son jumeau, non malade, avait des empreintes normales. Les dermatoglyphes serviraient d'indicateurs sur l'exposition éventuelle du fœtus à un environnement délétère.



Empreinte en boucle

Clémence CARRON est maître de conférences à l'Université Pierre et Marie Curie à Paris. Elle effectue ses recherches dans le Laboratoire de biologie du développement (CNRS UMR 7622).



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

✓ ROULETTE QUANTIQUE

Dans la méthode pour devenir riche exposée dans l'article *Suicide et immortalité quantiques* (*Pour la Science* n°395, septembre 2010, <http://bit.ly/pls395-immortalite>), pourquoi ne laisser en vie que le gagnant et tuer les 19 autres participants ? Si le dispositif ne les tue pas, pour chacun, il y a un des mondes où il gagne 20 fois la mise et, dans les 19 autres, il perd. N'est-ce pas préférable à gagner dans un monde, et être mort dans les 19 autres ?

Francis Jamet

→ RÉPONSE DE JEAN-PAUL DELAHAYE

Si vous n'avez pas conscience de mourir et ne souffrez pas dans les mondes où vous mourrez, l'effet pour vous de la roulette avec les 19 amis

est un gain certain, sans le moindre inconvénient, ce qui est bien sûr préférable au risque à 95 pour cent de perdre l'argent engagé. La difficulté, énorme, est d'être sûr que la théorie d'Everett est juste ! Par ailleurs, ce type de protocole pose des questions éthiques (votre question l'illustre).

✓ FRACTALES INUTILEMENT COMPLEXES

La voie choisie pour généraliser les ensembles de Julia et de Mandelbrot à trois dimensions dans l'article *Du relief pour les fractales* (*Pour la Science* n° 395, septembre 2010, <http://bit.ly/pls395-fractales>) me laisse perplexe. Julia, bien avant l'informatique, s'était intéressé à une classe de transformations qui se prêtaient bien au calcul. Mandelbrot étudia par le calcul numérique ces mêmes classes, mais cette

restriction n'était plus utile. En considérant des transformations plus générales, on peut passer sans difficulté à trois dimensions. S'est-on compliqué la tâche ?

Alfred Meyer

→ RÉPONSE DE JEAN-PAUL DELAHAYE

Comme il n'y a pas d'aussi « bonne structure » pour $\mathbb{R}^3$ qu'il y en a pour $\mathbb{R}^2$ (muni d'une structure de corps, avec une « multiplication » des points), on ne savait pas adapter directement les idées de la dimension 2 à la dimension 3. Il a donc fallu faire des essais, et c'est un peu par chance qu'on a trouvé une fonction qui produit une complexité fractale intéressante. Il n'était pas évident *a priori* que l'absence de structure de corps sur $\mathbb{R}^3$ puisse être surmontée ; cela a pu être fait, c'est la nouveauté de ces fractales 3D.

RESTEZ CONNECTÉ !

Restez en contact avec l'actualité scientifique : Retrouvez *Pour la Science* partout sur le web.

- Rejoignez-nous sur Facebook
<http://bit.ly/pls-facebook>
- Suivez-nous sur Twitter
<http://twitter.com/PourlaScience>
- Abonnez-vous à nos flux RSS
<http://bit.ly/pls-rss>
- Recevez nos lettres d'information
<http://bit.ly/pls-newsletters>
- Visitez notre site Internet
<http://www.pouirlascience.fr>

SONDAGE

Faites-vous confiance à la science ?

Selon un sondage international réalisé en ligne par le groupe de publications auquel appartient Pour la Science, les personnes ayant une formation scientifique font encore confiance aux chercheurs – parfois avec quelques réserves.

Plusieurs affaires ont récemment défrayé la chronique du monde scientifique : divulgation de courriels de climatologues révélant une certaine forme de censure, exagération de la menace de la grippe H1N1 par les autorités de santé, qui auraient ainsi favorisé les intérêts financiers de l'industrie phar-

maceutique, fraudes scientifiques de certains chercheurs, etc. Ces événements ont-ils écorné la confiance accordée aux scientifiques, consultés lors des décisions stratégiques prises en matière de climat, d'énergie, de santé ou de technologie ?

Pour le savoir, *Scientific American* s'est associée avec la revue *Nature* et ses édi-

tions internationales, dont *Pour la Science*, pour sonder en ligne les lecteurs. Plus de 21 000 personnes ont répondu via les sites Web de ces publications. Les personnes ayant répondu ont une formation scientifique (19 pour cent d'entre eux ont un doctorat) et soutiennent la science. Mais les attitudes diffèrent selon le thème et le pays.

DANS QUELLE MESURE FAITES-VOUS CONFIANCE À CE QUE DISENT LES SCIENTIFIQUES ?

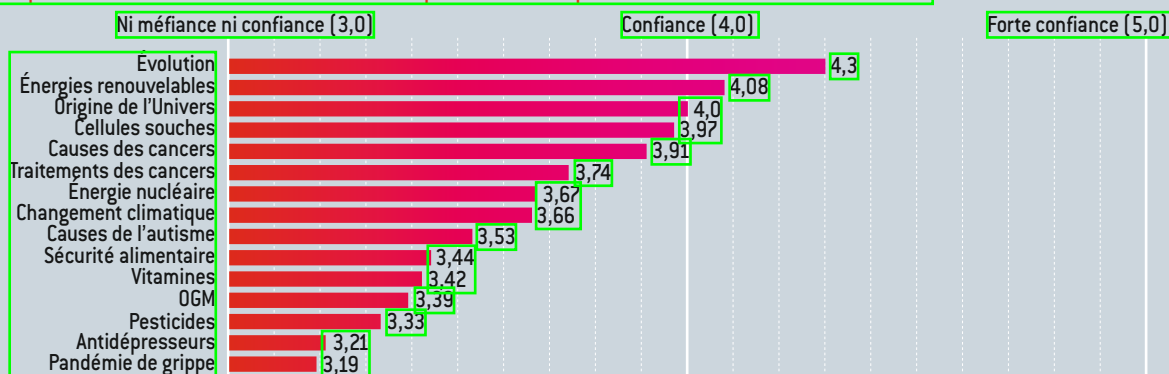
Les personnes sondées devaient indiquer, sur une échelle de 1 (forte méfiance) à 5 (forte confiance), le degré de confiance qu'elles accordent à différents groupes : scientifiques, amis, associations, journalistes, etc. Les scientifiques arrivent largement en tête (avec une moyenne de

3,98 sur 5, contre 2,57 pour les journalistes). En revanche, quand on les interroge sur un aspect précis, seuls trois thèmes (l'évolution, les énergies renouvelables et les origines de l'Univers) recueillent un score de confiance supérieur à cette moyenne.

À qui généralement faites-vous confiance pour obtenir des informations exactes sur des questions importantes pour la société ?



Dans quelle mesure faites-vous confiance à ce que les scientifiques disent sur les thèmes suivants ?



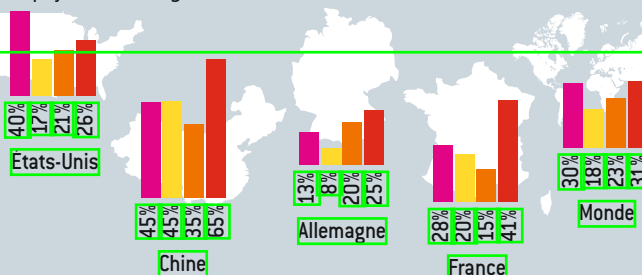
Toutes les illustrations sont d'Arno Ghelli

QUAND LA SCIENCE RENCONTRE LA POLITIQUE

Les chercheurs doivent-ils s'impliquer politiquement ? Les avis des lecteurs divergent selon leur origine. En Allemagne, où la chancelière est titulaire d'un doctorat en chimie quantique, il semble que l'on approuve que les scientifiques jouent un grand rôle en politique. Ce n'est pas le cas en Chine, alors même que la plupart des dirigeants de ce pays sont des ingénieurs.

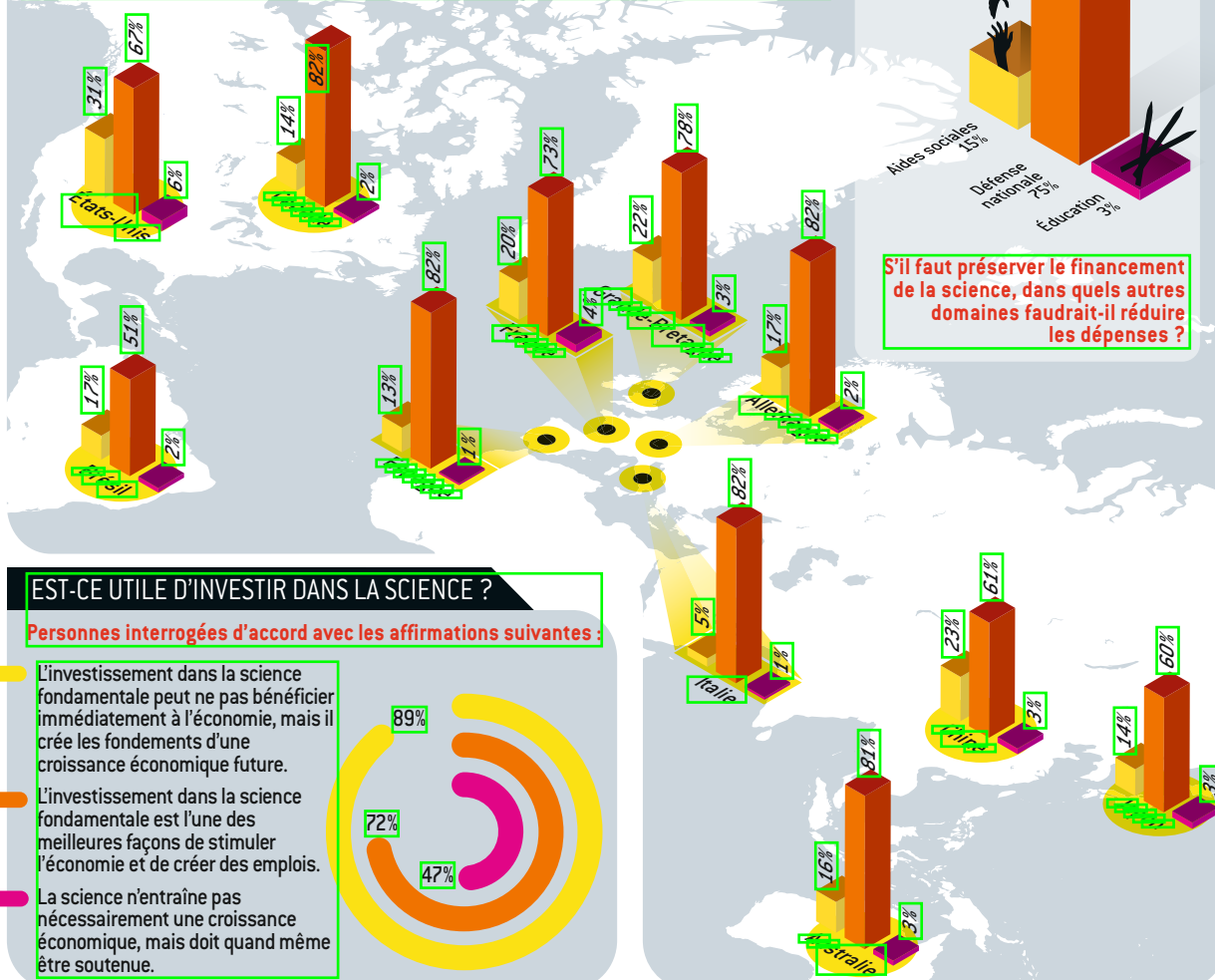
Personnes interrogées qui étaient d'accord avec les affirmations suivantes :

- Les scientifiques devraient seulement parler de science, sans prendre parti.
- Les scientifiques devraient rester à l'écart de la politique.
- Les scientifiques sont ceux qui savent le mieux ce qui est bien pour la population.
- Les scientifiques devraient prêter attention aux souhaits de la population, même s'ils pensent que les citoyens ont tort ou ne comprennent pas leurs travaux.



PAS DE RESTRICTIONS BUDGÉTAIRES POUR LA SCIENCE

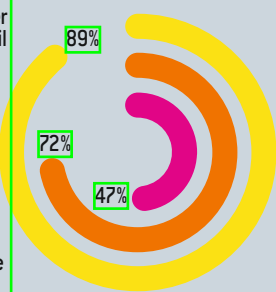
Plus de 70 pour cent des personnes ayant répondu au sondage souhaitent qu'en période d'austérité, le financement de la science continue à être assuré. Quand on leur demande où l'on pourrait faire des économies, la défense nationale (en orange) vient loin devant les aides sociales (en jaune) et l'éducation (en violet).



EST-CE UTILE D'INVESTIR DANS LA SCIENCE ?

Personnes interrogées d'accord avec les affirmations suivantes :

- L'investissement dans la science fondamentale peut ne pas bénéficier immédiatement à l'économie, mais il crée les fondements d'une croissance économique future.
- L'investissement dans la science fondamentale est l'une des meilleures façons de stimuler l'économie et de créer des emplois.
- La science n'entraîne pas nécessairement une croissance économique, mais doit quand même être soutenue.



INQUIÉTUDE FACE AUX TECHNOLOGIES

La technologie peut avoir des conséquences indésirables. Nous avons demandé aux internautes quelles technologies devraient être contrôlées de plus près. Les personnes interrogées expriment plus d'inquiétudes vis-à-vis de l'énergie nucléaire que de la vie artificielle, des cellules souches ou des organismes génétiquement modifiés (OGM).

47%



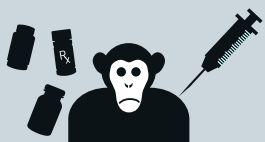
On devrait éliminer l'énergie nucléaire et la remplacer par d'autres sources d'énergie propre.

26%



Le gouvernement devrait agir maintenant pour protéger la population des risques inconnus des nanotechnologies.

23%



Je suis opposé aux expériences sur les chimpanzés en toutes circonstances.

22%



Les OGM sont trop risqués pour la santé et l'environnement et ne devraient pas être cultivés.

12%



Je suis opposé aux expériences sur les mammifères non primates en toutes circonstances.

8%



Je suis opposé aux expériences sur l'embryon humain en toutes circonstances.

7%



On ne devrait pas poursuivre les recherches sur les organismes artificiels avant d'avoir montré qu'ils ne présentent aucun danger.

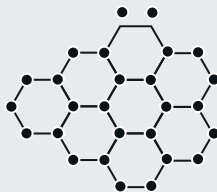
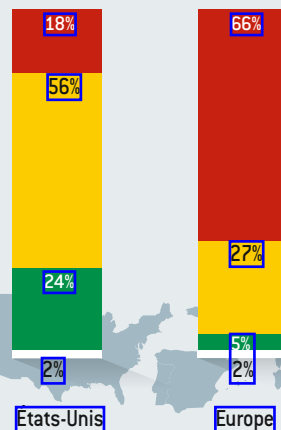
EUROPE VERSUS ÉTATS-UNIS

Les Européens et les Américains ont des attitudes très différentes vis-à-vis de la technologie. Les personnes ayant répondu au sondage et vivant en Europe sont davantage préoccupées par l'énergie nucléaire et les OGM que celles vivant aux États-Unis (ici, l'Europe comprend l'Allemagne, la Belgique, la France, l'Italie et l'Espagne, mais pas la Grande-Bretagne, où les opinions sont davantage alignées sur celles des États-Unis). Tant en Europe qu'aux États-Unis, les nanotechnologies semblent une grande inconnue. Les Européens ont aussi exprimé une méfiance vis-à-vis de ce que les scientifiques ont à dire sur la pandémie de grippe (voir l'encadré page ci-contre).



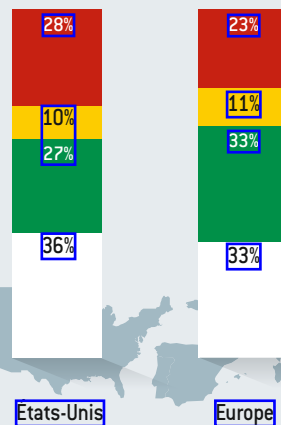
Face aux risques que peut poser l'énergie nucléaire, êtes-vous :

- Mal à l'aise
- Assez à l'aise
- Tout à fait à l'aise
- Sans opinion



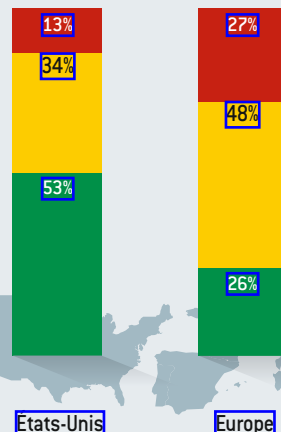
Face aux risques que peuvent poser les nanotechnologies, êtes-vous :

- Mal à l'aise
- Assez à l'aise
- Tout à fait à l'aise
- Sans opinion

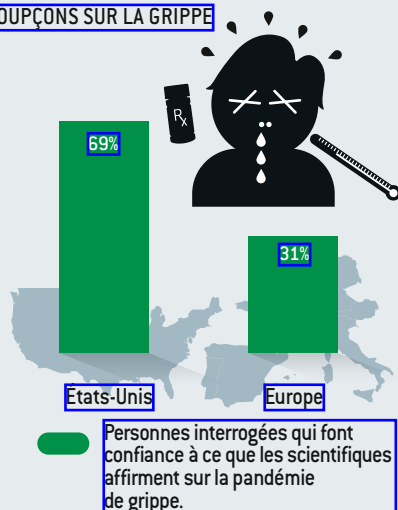


Face aux risques que peuvent poser les OGM, êtes-vous :

- Mal à l'aise
- Assez à l'aise
- Tout à fait à l'aise



SOUÇONS SUR LA GRIPPE

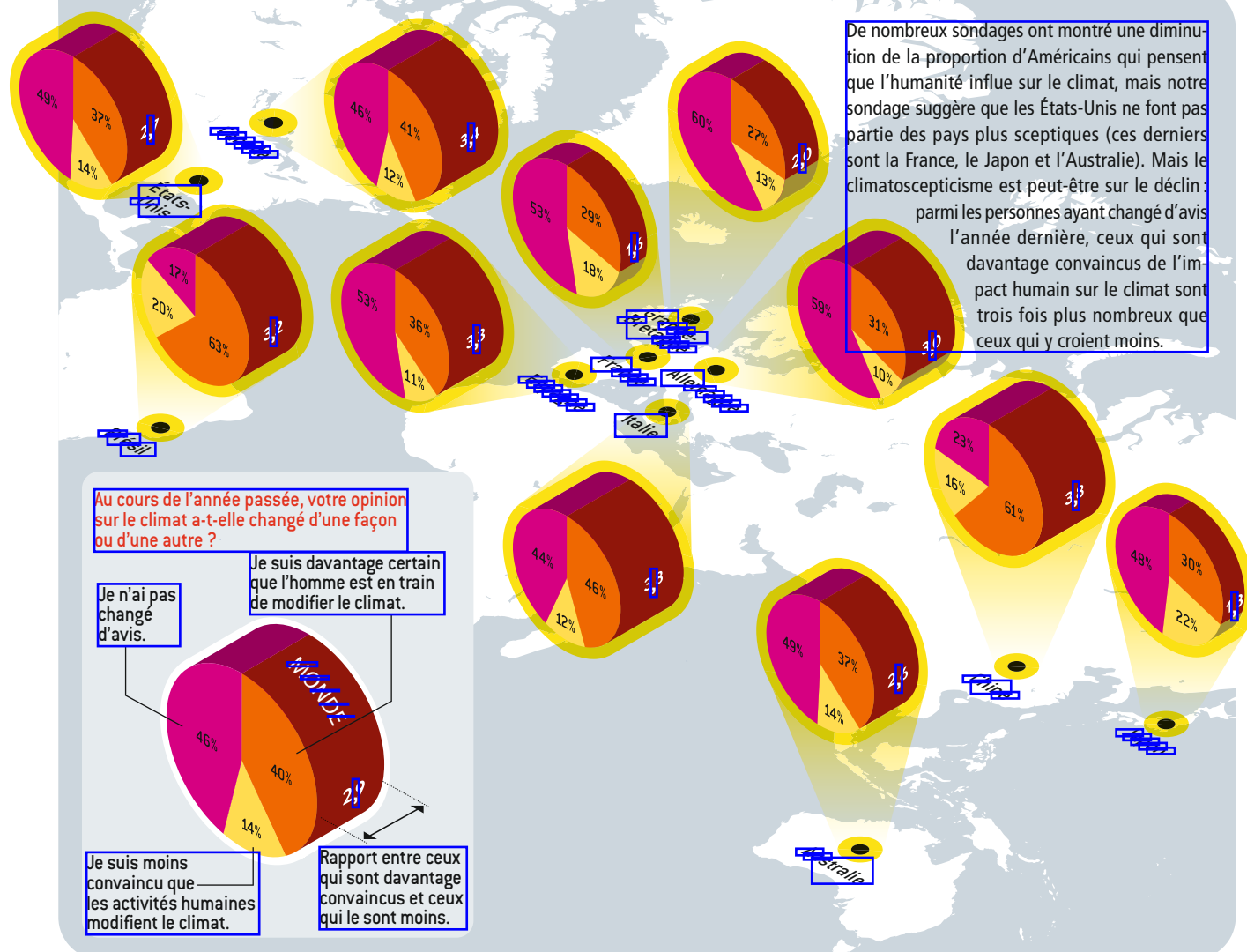


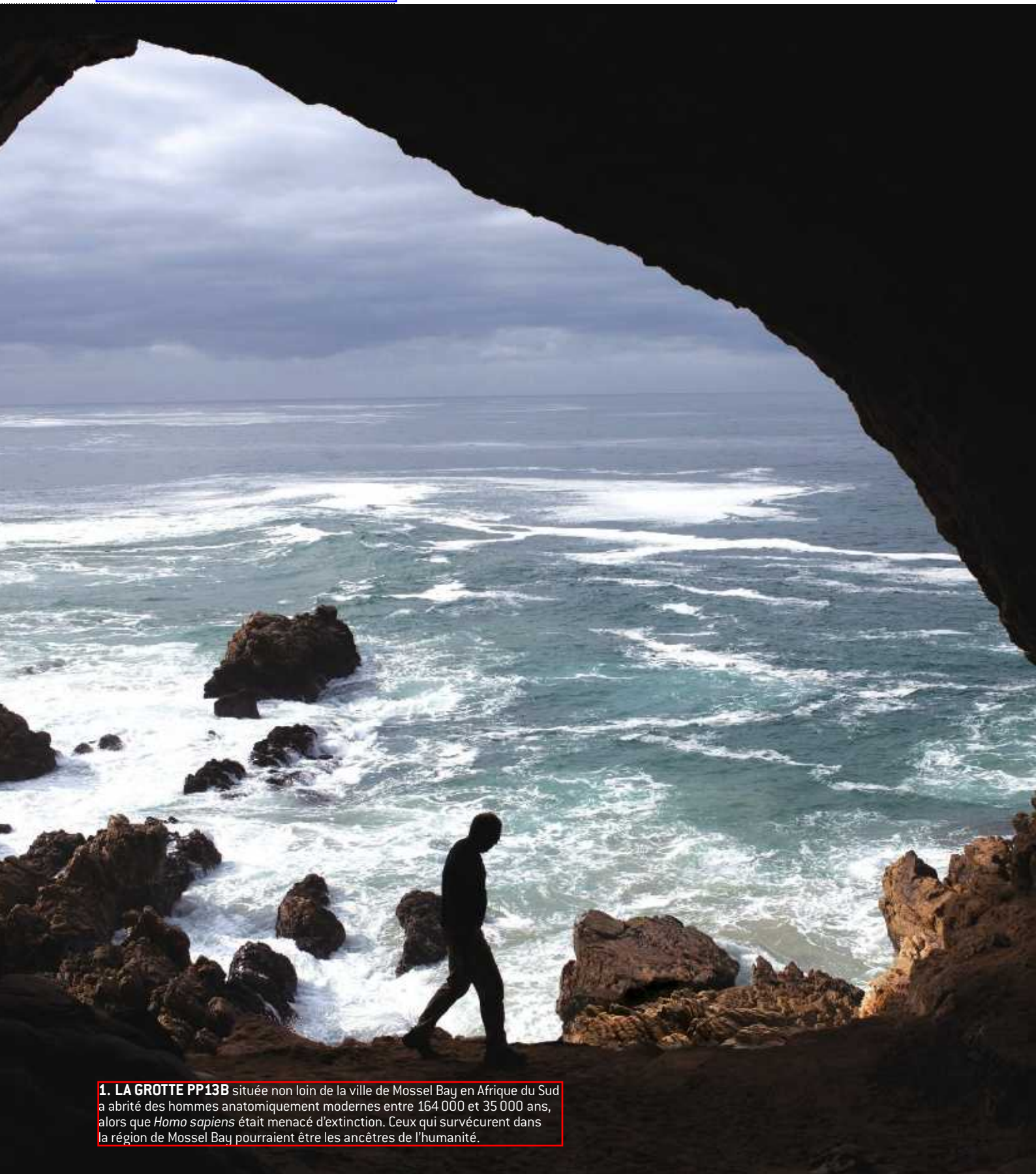
Le 11 juin 2009, l'OMS déclarait l'état de pandémie pour la grippe H1N1, confirmant ce que les virologistes savaient déjà : le virus s'était répandu dans le monde entier. Les gouvernements ont commandé des vaccins et des antiviraux pour des milliards d'euros, un arsenal médical qui était prêt à combattre un virus qui, heureusement, s'est révélé peu agressif.

Une année plus tard, deux études européennes ont dénoncé l'existence de conflits d'intérêts dans le processus de prise de décision de l'OMS. En 2004, une commission de l'OMS avait recommandé que les gouvernements constituent des stocks d'antiviraux lors d'une pandémie ; il s'est révélé plus tard que les scientifiques ayant participé à cette commission avaient des liens avec l'industrie pharmaceutique. L'OMS a refusé de révéler l'identité des scientifiques ayant fait partie en 2009 de la commission qui a préconisé la déclaration de l'état de pandémie ; cela a nourri le soupçon que ces experts aussi aient pu être liés à l'industrie pharmaceutique.

La controverse a eu beaucoup d'échos dans les médias en Europe, peu aux États-Unis. Près de 70 pour cent des Américains ayant répondu à notre sondage ont déclaré faire confiance à ce que disent les scientifiques sur la pandémie de grippe ; pour les Européens, cette proportion n'est que de 31 pour cent. C'est la plus grande divergence entre l'Europe et les États-Unis constatée dans ce sondage.

MOINS DE DÉNÉGATIONS SUR LE CLIMAT





1. LA GROTTTE PP13B située non loin de la ville de Mossel Bay en Afrique du Sud a abrité des hommes anatomiquement modernes entre 164 000 et 35 000 ans, alors que *Homo sapiens* était menacé d'extinction. Ceux qui survécurent dans la région de Mossel Bay pourraient être les ancêtres de l'humanité.

Quand la MER sauva l'humanité

Les conditions climatiques qui ont suivi de peu l'apparition d'*Homo sapiens* étaient si rudes qu'elles auraient pu faire disparaître notre espèce. Grâce aux ressources de la côte Sud de l'Afrique, une toute petite population – sans doute nos ancêtres – y survécut.

Curtis Marean

Nous sommes sept milliards sur Terre. Comment imaginer qu'un jour, l'humanité a failli disparaître ? Pourtant, notre ADN indique que cela a failli se produire il y a moins de 200 000 ans. Nous proposons ici un scénario expliquant comment nos ancêtres auraient survécu : ils se seraient réfugiés à l'extrémité de l'Afrique du Sud, parce qu'ils y auraient trouvé des conditions favorables à leur survie...

À quelle époque s'est produite cette quasi-extinction de notre espèce ? Les plus anciens ossements d'*Homo sapiens* sont deux crânes éthiopiens vieux de 195 000 ans. Le climat terrestre était alors doux et la nourriture abondante, mais il a commencé à se refroidir : une période glaciaire a commencé pour s'achever – à quelques périodes de redoux près – il y a 123 000 ans.

Si nous sommes certains que nos ancêtres ont dû affronter ces conditions difficiles, il n'existe pas d'enregistrement détaillé du climat africain pendant cette période froide nommée stade isotopique 6. Toutefois, les climatologues se fondent sur ce qu'ils savent des glaciations récentes, mieux connues, pour affirmer que le stade isotopique 6 fut très froid et, par conséquent, très sec. Les déserts africains devaient être plus étendus qu'aujourd'hui et une grande partie de la terre d'Afrique était sans doute inhabitable.

Or, pendant que la planète est restée sous l'emprise des glaces, notre espèce semble être passée par un goulot d'étranglement génétique, c'est-à-dire qu'elle a subi une réduction rapide de sa diversité. L'étude de nos gènes montre en effet que la diversité génétique d'*Homo sapiens* est bien plus faible que celles de plusieurs autres espèces, dont la taille des populations et les aires de répartition sont plus petites que les nôtres...

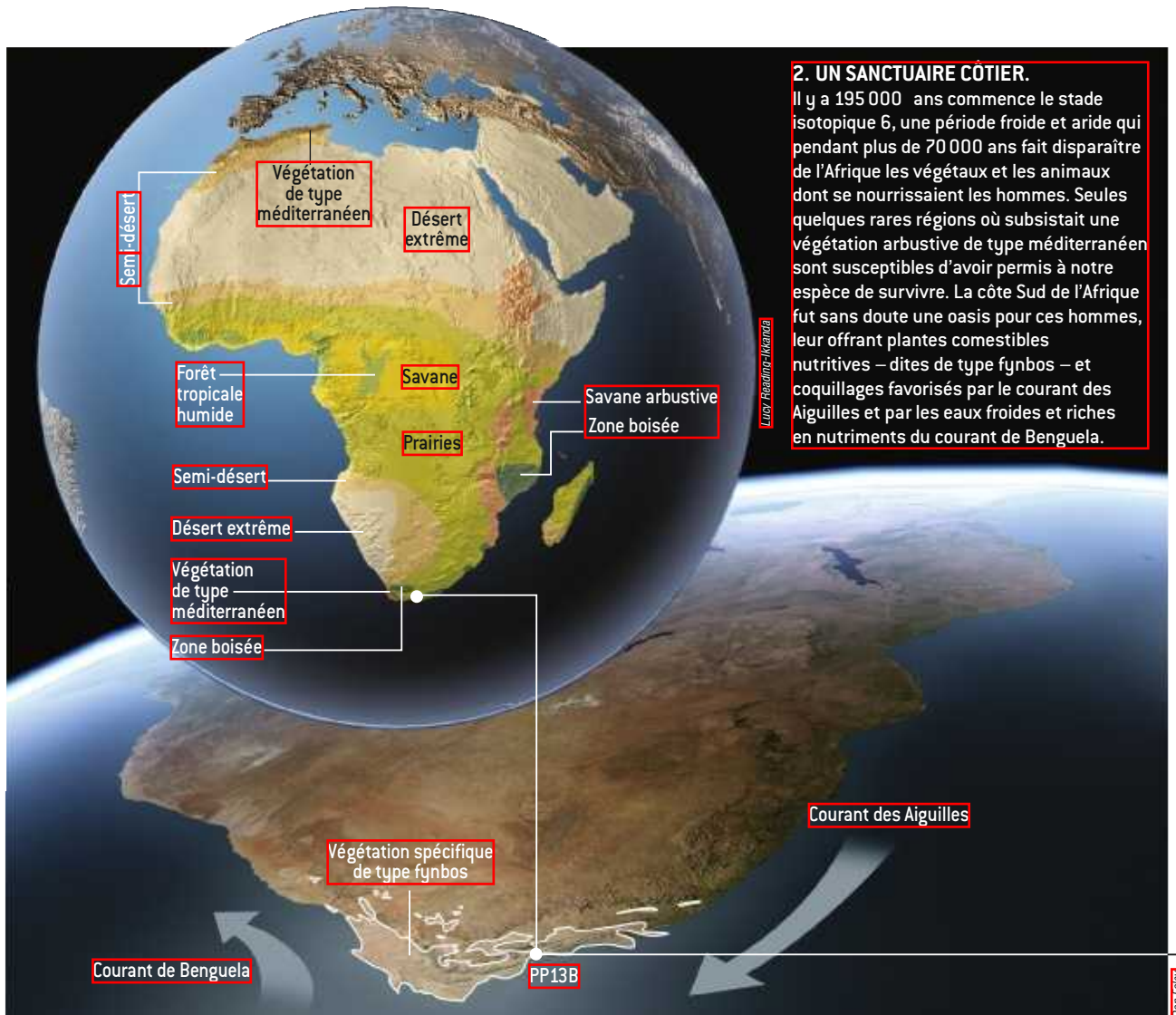
Selon les estimations, le nombre de reproducteurs de l'espèce *Homo sapiens* serait passé pendant le stade isotopique 6 de plus de 10 000 à quelques centaines. Certes, les chiffres varient d'une étude à l'autre, mais la plupart suggèrent que nous descendons d'une toute petite population qui vivait alors en Afrique.

Où avaient-ils trouvé refuge ? Les paléanthropologues continuent à en débattre. Seules quelques régions ont pu avoir assez de ressources pour répondre aux besoins de chasseurs-cueilleurs. La côte Sud de l'Afrique, si riche en ressources marines et végétales, me semblait une hypothèse plausible. C'est pourquoi, en 1991, j'ai décidé de me rendre sur place.

Mes recherches ne se sont pas faites au hasard : je cherchais des abris sous roches proches de la paléocôte (donnant accès aux coquillages) et assez élevés pour que

L'ESSENTIEL

- ✓ Pendant la période glaciaire qui a duré de 195 000 à 123 000 ans, le nombre d'*Homo sapiens* a considérablement diminué.
- ✓ La sécheresse engendrée par le froid a rendu inhabitable la plus grande partie des zones où vivaient nos ancêtres.
- ✓ La région du Cap est l'un des rares sanctuaires où les hommes pouvaient se réfugier, car coquillages et plantes comestibles y abondaient.
- ✓ Une petite population humaine a résisté à la crise climatique, laissant derrière elle de nombreux indices de capacités cognitives développées.



2. UN SANCTUAIRE CÔTIER.

Il y a 195 000 ans commence le stade isotopique 6, une période froide et aride qui pendant plus de 70 000 ans fait disparaître de l'Afrique les végétaux et les animaux dont se nourrissaient les hommes. Seules quelques rares régions où subsistait une végétation arbustive de type méditerranéen sont susceptibles d'avoir permis à notre espèce de survivre. La côte Sud de l'Afrique fut sans doute une oasis pour ces hommes, leur offrant plantes comestibles nutritives – dites de type fynbos – et coquillages favorisés par le courant des Aiguilles et par les eaux froides et riches en nutriments du courant de Benguela.

L'AUTEUR



Curtis MAREAN est professeur à l'Institut d'étude de l'évolution humaine et des changements sociaux de l'Université d'État d'Arizona.

les sédiments n'aient pas été détruits par la remontée de la mer après que le climat a commencé à se réchauffer, il y a quelque 123 000 ans. En 1999, avec mon collègue sud-africain Peter Nilssen, nous avons décidé d'explorer les grottes repérées sur le promontoire rocheux Pinnacle Point non loin de la ville de Mossel Bay.

Nous sommes difficilement descendus le long de la falaise abrupte faisant face à l'océan Indien (voir la figure 1), et c'est là que nous avons découvert la caverne qui devait devenir PP13B : la « grotte de Pinnacle Point 13 B ». Tout de suite, PP13B nous a paru prometteuse, puisque des vestiges préhistoriques étaient visibles à l'entrée de la grotte au sein de strates érodées. On y apercevait des restes de foyer et d'outils lithiques. Ces vestiges semblaient d'autant plus prometteurs qu'ils étaient recouverts par de la calcite et par une dune de sable, prouvant leur ancienneté.

Après avoir fait construire un escalier de 160 marches pour accéder au site, nous avons commencé à fouiller PP13B et d'autres sites voisins. Depuis, le travail accompli nous a livré un riche tableau des activités des habitants de la région de 164 000 à 35 000 ans, donc pendant le déclin de population lié au stade isotopique 6. Nous en avons tiré un scénario plausible de la façon dont les habitants de la région ont survécu au froid et à la sécheresse.

Pour se nourrir, ils ont exploité les ressources de l'extraordinaire biotope de la côte Sud de l'Afrique. Autour du Cap, une étroite bande de terre qui longe la côte présente la biodiversité végétale la plus riche du monde compte tenu de sa petite taille. Cette région – la région florale du Cap – couvre 90 000 kilomètres carrés et ne comprend pas moins de 9 000 espèces végétales, dont 64 pour cent sont endémiques. Ainsi, la montagne de la Table abrite plus



3. LES GROTTES ENTOURANT PP13B creusées dans la face abrupte d'un promontoire nommé Pinnacle Point, en Afrique du Sud, sont proches de la mer, permettant l'accès aux ressources maritimes, et suffisamment élevées pour que les traces d'une présence humaine aient été conservées. Toutes ces cavernes ont fourni un riche matériel archéologique remontant au stade isotopique 6.

d'espèces végétales que le Royaume-Uni... Deux types de végétation, où les arbustes dominant, occupent la plus grande partie de la zone florale: le fynbos (« fin maquis », en afrikaner) et le renosterveld (champs à rhinocéros). Ces deux types de biotopes comportent la plus grande variété au monde de géophytes, ces plantes dont les bulbes ou tubercules sont enterrés.

Aptes à résister aux conditions climatiques difficiles, les géophytes représentent encore une source de nourriture importante pour les chasseurs-cueilleurs d'aujourd'hui. Plusieurs raisons les rendent particulièrement intéressantes: ils contiennent beaucoup de sucres; la concentration de ces glucides est maximale à certaines époques de l'année; ils ont peu de prédateurs, contrairement aux fruits, aux graines... Les plantes à bulbes qui prédominent dans la Région florale du Cap sont encore plus intéressantes, car, loin d'être aussi fibreuses que la plupart des géophytes, elles contiennent, à quantités de glucides égales, peu de fibres. Cela les rend plus digestes pour les enfants, qualité que la cuisson améliore encore. Et comme les géophytes ont évolué pour s'adapter à l'aridité, il n'y a aucune raison

de douter qu'ils ont constitué une ressource alimentaire pendant les phases glaciaires arides (nombre de géophytes poussent dans le désert du Kalahari!).

Pour autant, la côte Sud de l'Afrique n'est qu'un médiocre terrain de chasse, car les grands mammifères y sont rares. Elle offrait néanmoins une source importante de protéines: ses coquillages. La rencontre le long des côtes Sud de l'Afrique des eaux froides et riches en nutriments du courant du Benguela et des eaux chaudes du courant des Aiguilles crée de très nombreux remous froids et chauds. Ces courants alimentent en nutriments d'immenses bancs de coquillages découverts à marée basse. Or les coquillages constituent une source de protéines et d'acides gras insaturés (les oméga 3). Et comme avec les géophytes, un climat froid ne réduit pas leur nombre, puisque des eaux plus froides favorisent le développement des coquillages!

Les protéines riches en nutriments des coquillages et les glucides énergétiques des géophytes procuraient un régime alimentaire idéal aux premiers hommes modernes qui vivaient sur la côte Sud de l'Afrique pendant le stade isotopique 6. Notons en outre que ces ressources étaient

facilement accessibles aux femmes, qui s'affranchissaient ainsi des hommes pour leur subsistance et celle de leurs enfants. Si nous n'avons pas encore la preuve que les occupants de la grotte PP13B consommaient des géophytes, nous savons qu'ils consommaient des coquillages. Réalisée par Antonieta Jerardino, de l'Université de Barcelone, l'étude des coquilles trouvées à PP13B montre que les habitants pêchaient sur le rivage des moules et les escargots de mer que les Afrikaners nomment alikreukel (*Turbo sarmaticus*). À l'occasion, ils mangeaient aussi de la chair de phoque ou de baleine.

Les techniques de survie

Avant la découverte de PP13B, nous connaissions des cas de groupes humains ayant exploité les ressources marines, mais ils dataient de moins de 120 000 ans. Or les datations effectuées par Miryam Bar-Matthews, du Service géologique israélien, et par Zenobia Jacobs, de l'Université de Wollongong en Australie, prouvent qu'à PP13B, les ressources de la mer étaient exploitées depuis 164 000 ans. Il y a quelque 110 000 ans, le menu semble s'être enrichi de diverses espèces, telles les patelles et les moules.

Ramasser des bivalves et des gastéropodes sur la côte rocheuse proche de PP13B est plus difficile qu'il n'y paraît à première vue. Moules, patelles et escargots de mer vivent sur les rochers dans la zone d'estran, où les vagues, à marée montante, peuvent submerger un pêcheur imprudent. Le long de la côte, le ramassage des coquillages est surtout efficace pendant les marées basses de printemps, quand l'alignement du Soleil et de la Lune amplifie les marées. Or, il y a 164 000 ans, le niveau de la mer était plus bas, de sorte que PP13B se trouvait deux à cinq kilomètres à l'intérieur des terres. Comme la marée avance de 50 minutes chaque jour, il faut que les habitants de PP13B aient eu quelque moyen de situer dans le temps la hauteur des marées, sans doute grâce à une sorte de calendrier lunaire, comme en utilisent aujourd'hui tant d'habitants des côtes.

En outre, dans le matériel lithique découvert sur place, nous avons trouvé un nombre important de toutes petites lames, de petits éclats de pierre deux fois plus longs que larges. Le fait qu'ils soient trop petits pour être tenus en main suggère que ces lamelles étaient des armatures: elles



4. LE RAMASSAGE DES COQUILLAGES, riches en protéines, a probablement contribué à la survie de la population de Pinnacle Point (a). Des moules (b) ont été retrouvées dans les niveaux les plus profonds de PP13B, qui datent d'il y a 164 000 ans, ce qui prouve une



exploitation humaine des ressources marines bien plus précoce que ce que l'on pensait. Les hommes de Pinnacle Point recueillaient aussi différents types de patelles et d'escargots de mer, ainsi que les coquilles vides (c).



5. FABRICATION DES OUTILS. Des microlames (les deux rangées en bas à gauche de l'illustration) se trouvent parmi les outils lithiques utilisés à PP13B il y a 164 000 ans. Il s'agit sans doute d'armatures à fixer sur une hampe de bois pour obtenir des armes de jet. Ceux qui fabriquaient ces outils semblent avoir traité thermiquement la pierre pour la rendre plus facile à tailler, un type de technique que l'on croyait avoir été inventée seulement 144 000 ans plus tard, en France !

servaient à armer une hampe en bois, utilisée ensuite comme armes de jet. On sait pour l'avoir étudié aux époques ultérieures, que pareille production d'outils composites exige un savoir-faire technique notable. Les indices de la fabrication de pareilles armes de jet, il y a 164 000 ans dans la région de Pinnacle Point représentent l'un des plus anciens témoignages de la maîtrise par l'humanité de ce savoir-faire. Mais nous avons vite découvert que ces minuscules outils étaient encore plus complexes que nous ne le pensions.

La plupart des outils lithiques préhistoriques retrouvés sur les côtes de l'Afrique du Sud sont fabriqués à partir de quartzite. Cette roche à gros grains convient parfaitement au débitage de gros éclats, mais pas du tout à celui de lamelles. Pour les obtenir, les habitants des sites de la côte Sud ont utilisé une roche nommée silcrète, sorte de conglomérat de grains fins cimenté par de la silice. Kyle Brown, de l'Université d'État de l'Arizona, notre expert en outils lithiques, a passé des années à ramasser du silcrète sur la côte et à l'étudier. Or il a été surpris par l'aspect des outils en silcrète de Pinnacle Point et des sites voisins : leur

coloration brillante rouge et grise était tout à fait inhabituelle. Par ailleurs, il est quasi impossible de débiter le silcrète brut en lamelles. Dès lors, d'où venait ce silcrète de qualité supérieure ?

Un indice retrouvé dans la grotte 5-6 de Pinnacle Point nous a mis sur la piste d'une réponse possible. Nous y avons retrouvé un gros morceau de silcrète dans de la cendre. La roche avait la même couleur et le même brillant que le silcrète découvert dans d'autres dépôts archéologiques de la région. Étant donné cette association de la roche avec la cendre, nous nous sommes demandé si les anciens tailleurs avaient traité le silcrète par le feu ? De nombreux textes ethnographiques mentionnent de pareilles techniques en Amérique du Nord et en Australie. K. Brown a donc « cuit » du silcrète brut, puis tenté de le tailler. Il a effectivement réussi à débiter de fins éclats, dont les surfaces avaient le même aspect brillant que les artefacts provenant de nos sites. Nous en avons conclu que, pendant le stade isotopique 6, les habitants de la région de PP13B ne taillaient le silcrète qu'après traitement thermique.

En convaincre nos confrères fut une rude bataille (voir l'encadré page 30). En archéologie préhistorique, une sorte de dogme attribuait en effet aux Solutréens l'invention du traitement thermique des pierres à tailler. Cette population (du site éponyme de Solutré en Saône-et-Loire) était censée avoir développé cette technique il y a quelque 20 000 ans afin de produire ses magnifiques outils. Afin d'étayer notre hypothèse, nous avons utilisé trois approches indépendantes. Chantal Tribolo, du CNRS et de l'Université de Bordeaux, a effectué une analyse par thermoluminescence pour déterminer si les outils en silcrète provenant de Pinnacle Point avaient été chauffés. Puis Andy Herries, de l'Université de New South Wales en Australie, a fait des mesures de susceptibilité magnétique. Cette grandeur physique, qui caractérise la capacité d'un matériau à s'aimanter, est modifiée par la chaleur. Enfin, K. Brown a utilisé un appareil capable de caractériser le lustre produit sur les outils lithiques en silcrète supposé chauffé, et l'a comparé avec la même microcouche sur les outils fabriqués par ses soins. Les résultats obtenus suggèrent que le traitement thermique des roches fut employé de façon intermittente à Pinnacle Point à partir de 164 000 ans,

et qu'il est devenu une technique usuelle il y a 72 000 ans.

L'emploi de traitements thermiques révèle deux capacités cognitives caractéristiques des hommes modernes. En premier lieu, les habitants de la région de Pinnacle Point ont compris qu'ils pouvaient modifier par le feu les propriétés d'un matériau pour en faciliter la taille. Par ailleurs, ils ont su inventer et optimiser la série complexe des étapes nécessaires à la production de lamelles de silcrète. Il s'agissait de construire un puits dans le sable pour y chauffer le silcrète, maîtriser la température afin de parvenir doucement jusqu'à 350° C, maintenir cette température, puis la faire diminuer progressivement. La création et la mise au point de ce processus, puis sa transmission de génération en génération ont probablement impliqué le langage. Après avoir acquis ces capacités, nos ancêtres ont sans doute pu rivaliser avec les autres espèces humaines rencontrées lorsqu'ils ont migré. Leur maîtrise du feu a pu en particulier les avantager quand, parvenus dans les pays froids, ils sont entrés en contact avec les Néandertaliens, qui, apparemment, n'avaient pas cette capacité.

En plus d'être avancés au plan technique, les habitants préhistoriques de Pinnacle Point l'étaient aussi au plan artistique. Dans les couches les plus anciennes de PP13B, nous avons mis au jour des dizaines

BIBLIOGRAPHIE

Kyle Brown et al., Fire as an engineering tool of early modern humans, *Science*, vol. 325, pp. 859-862, 2009.

Curtis Marean et al., Early human use of marine resources and pigment in South Africa during the Middle Pleistocene, in *Nature*, vol. 449, pp. 905-908, 2007.

Marian Vanhaeren et Francisco d'Errico, Aux origines de la parure, *Pour la Science*, n° 369, 2008.

K. Wong, À l'aube de la pensée symbolique, *Pour la Science* n° 333, juillet 2005.

Christopher Henshilwood et Curtis Marean, The origin of modern human behavior : critique of the models and their test implications, *Current Anthropology*, vol. 44, n° 5, pp. 627-651, 2003.



6. CREUSER POUR DINER.

Les bulbes ou tubercules de certains végétaux nommés géophytes (à gauche) contiennent beaucoup de glucides. Les biotopes côtiers de l'Afrique du Sud sont riches en géophytes nutritifs et digestes, tels les fynbos typiques de cette région (ci-dessus).

La Préhistoire méconnue de l'Afrique australe

Se fondant sur la faible diversité génétique de notre espèce établie par plusieurs études, C. Marean avance que nous descendons tous d'une petite population, qui dans sa migration de survie serait venue buter sur les confins océaniques de l'immense Afrique. La thèse est plausible, mais nous allons expliquer pourquoi plusieurs éléments de sa démonstration sont encore fragiles.

En pleine renaissance, la Préhistoire de l'Afrique du Sud a souffert d'un long isolement. Le Paléolithique moyen, que l'on nomme en anglais *Middle Stone Age* ou MSA, y est représenté par des sites nombreux, mais souvent mal fouillés et mal datés. On manque donc de certitudes chronologiques pour déterminer vers quelle date les premiers groupes d'*Homo Sapiens* sont parvenus au bout de l'Afrique. De même que nous manquons totale-

ment de données fiables sur les climats qui ont régné en Afrique, particulièrement équatoriale et tropicale, durant le stade isotopique 6 ou après. L'Afrique était-elle alors vraiment inhabitable? On l'ignore.

Les restes humains attribuables au MSA mis au jour dans ce vaste pays sont encore rares. Les sites de Border Cave, Klasies river mouth, Blombos cave et Die Kelders cave ont livré les séries de restes d'*Homo Sapiens* les plus importantes et « parlantes ». Force est de constater que les populations africaines pléistocènes nous sont encore mal connues.

Nombre de sites du MSA d'Afrique du Sud, souvent plus récents que Pinnacle Point, se trouvent sur sa frange littorale. Toutes les populations correspondantes ont exploité les ressources de l'océan, ce qui est logique, car c'est bien plus facile que de partir pour de longues chas-

ses. Alors, une question de survie, la consommation de coquillages? Plus, de facilité, probablement!

S'agissant de la taille, les préhistoriens européens avaient montré que depuis 20 000 ans, la chauffe modérée de certains silex a été utilisée pour les rendre aptes à être façonnés ou débités par pression. Cette technique d'appoint a-t-elle été utilisée à Pinnacle Point beaucoup plus tôt? C'est possible, mais les traces de feu étant omniprésentes sur les sites du MSA, la chauffe accidentelle de blocs est également envisageable. Accidentelle ou pas, elle modifie la couleur d'origine du matériau et sa susceptibilité magnétique.

La démonstration de l'intentionnalité de la chauffe est aisée à faire pour le silex, elle semble plus difficile à faire pour un silicrète. Son traitement thermique est

une hypothèse séduisante qui constituerait une avancée importante si elle était définitivement confirmée. Notons que la taille expérimentale montre que la fabrication de lames et lamelles dans ce type de roche ne pose aucun problème si l'on taille des silicrètes non traités de bonne qualité.

Pour leur part, les pigments minéraux rouges sont largement attestés dans de nombreux sites d'Afrique du Sud, tels Klasies river mouth, Blombos, Hollow rock shelter, Sibudu, ainsi que tout au long de la séquence de Diepkloof qui va de 121 000 à 45 000 ans. Cette dispersion est sans aucun doute une preuve presque directe et très ancienne d'expression symbolique.

Pierre-Jean TEXIER
CNRS, UMR 5199-PACEA,
Université de Bordeaux 1

de morceaux d'ocre rouge (oxyde de fer), diversement gravés, que l'on devait moudre pour créer une fine poudre. Celle-ci était ensuite probablement mélangée à un liant, une graisse animale par exemple, afin d'obtenir une peinture pouvant être appliquée sur le corps ou diverses surfaces. Les peintures corporelles et les décorations informent en général sur l'identité sociale ou d'autres traits culturels importants, puisque ce sont des informations symboliques. Nous sommes plusieurs à penser que cet ocre constitue le plus ancien témoignage sans équivoque d'un comportement symbolique, ce qui repousse de plusieurs dizaines de milliers d'années en arrière l'apparition de telles pratiques.

Des hommes d'esprit

Des indices d'activités symboliques existent aussi pour des périodes plus tardives dans la séquence des dépôts de PP13B. Des dépôts datant d'il y a 110 000 ans environ renferment à la fois de l'ocre rouge et des coquillages qui ont manifestement été ramassés sur la plage pour leur beauté, étant donné qu'il s'agit de coquillages ne vivant qu'en eau profonde. La découverte de ces coquillages décoratifs ainsi que le ramassage des

coquillages à Pinnacle Point suggèrent que la mer jouait un rôle primordial dans les rituels des habitants de la région.

Tant la maîtrise technique des habitants de Pinnacle Point que les indices de l'existence d'une forme de pensée symbolique éclairent les origines de notre espèce. Les fossiles OMO 1 et OMO 2 trouvés en Éthiopie montrent que des hommes anatomiquement modernes existent depuis au moins 195 000 ans. L'apparition du cerveau moderne est cependant difficile à situer dans le temps. Les paléontologues recherchent divers marqueurs dans les témoignages archéologiques pour repérer le début d'une forme de cognition avancée (moderne). Les outils fabriqués par des techniques impliquant de mettre en relation des phénomènes apparemment sans rapport et la mise en œuvre de longs processus de fabrication – tels les traitements thermiques – sont de tels marqueurs. Les activités artistiques et symboliques en sont d'autres, tout comme le repérage du temps qui passe grâce aux phases lunaires. Les plus anciens exemples de ces comportements ont été découverts en Europe et remontent à moins de 40 000 ans. Se fondant sur ces seules découvertes, les préhistoriens avaient conclu qu'un long décalage existait entre l'origine de notre

espèce et l'émergence des capacités cognitives de l'homme moderne.

Toutefois, au cours de ces dix dernières années, de nombreux sites en Afrique du Sud ont livré des exemples de comportements complexes précédant de loin leurs homologues en Europe. Ian Watts, un archéologue travaillant en Afrique du Sud, a par exemple décrit des centaines (voire des milliers) de morceaux d'ocre, travaillés ou non, provenant de sites datant de 120 000 ans. Tout comme celui de Pinnacle Point, cet ocre est souvent rouge, ce qui suggère que les hommes ramassaient de préférence des blocs d'ocre rouge dans la nature – peut-être parce qu'ils associaient cette couleur aux menstruations et à la fertilité. Dans la grotte de Blombos, située à environ 100 kilomètres à l'Ouest de Pinnacle Point, Christopher Henshilwood, de l'Université de Bergen en Norvège, a découvert des morceaux d'ocre comportant des gravures régulières, des colliers de perles faits avec des coquillages et des outils en os, datant tous de 71 000 ans environ. Toutes ces découvertes contredisent l'assertion selon laquelle la cognition moderne ne serait apparue que tardivement dans notre lignée; elles suggèrent plutôt l'existence de capacités cognitives très anciennes.

Nous pensons qu'une forte pression de sélection a dû exister, qui explique l'évolution de la cognition moderne : sans doute fallait-il, pour que survive sa lignée, pouvoir mémoriser les emplacements et les cycles végétatifs de très nombreuses espèces de végétaux dans des environnements arides, puis transmettre cette connaissance à sa progéniture et aux autres membres du groupe. Cette faculté a conduit à de nombreux autres progrès, par exemple la capacité de comprendre le lien entre les phases de la Lune et les marées. Les coquillages et les géophytes ont procuré à ces hommes un régime alimentaire de qualité, qui leur a permis de limiter leur nomadisme, d'accroître leur taux de fécondité et de réduire la mortalité infantile. L'augmentation de taille des groupes humains résultant de ces changements a favorisé la complexité sociale et, par là même, la pensée symbolique et le savoir technique.

En modélisant le « paléolittoral » autour de PP13B au cours du temps, Erich Fisher, de l'Université de Floride, a montré que le rivage a souvent changé très rapidement à cause de la présence du banc des

Aiguilles, un large plateau continental en pente douce qui se trouve face à la côte de l'Afrique du Sud. Ce plateau se découvrait largement dès que, la glaciation s'accroissant, le niveau des mers baissait, ce qui mettait l'océan à distance considérable de Pinnacle Point : jusqu'à 95 kilomètres. Quand, le climat se réchauffait, la mer revenait, les eaux marines recouvraient à nouveau le banc des Aiguilles, de sorte que les grottes se retrouvaient à nouveau au bord de la mer.

Suivre la mer

À en juger par les schémas de précipitations et de végétation apparaissant dans les enregistrements obtenus à partir des stalagmites couvrant la période comprise entre 350 000 et 50 000 ans, nous voyons que le fynbos a probablement suivi le retrait de la côte sur la plaque continentale actuellement submergée ; les géophytes et les coquillages se sont ainsi toujours trouvés proches les uns des autres. Quant aux hommes, en ces périodes de faible densité de population, ils avaient

toute liberté de s'installer à l'endroit le plus favorable pour la cueillette, c'est-à-dire là où l'on trouvait à la fois des géophytes et des coquillages, c'est-à-dire la côte.

Les témoignages génétiques, fossiles et archéologiques concordent pour indiquer que la première vague de migration – importante et prolongée – des hommes modernes s'est produite il y a environ 50 000 ans. Quels en ont été les déclencheurs ? Cette question reste ouverte. Par exemple, nous ne savons pas encore si, à la fin du stade isotopique 6, une unique population d'hommes anatomiquement modernes subsistait en Afrique, ou s'il y en avait plusieurs, dont peut-être une seulement, aurait donné naissance aux hommes d'aujourd'hui. Ces questions nous invitent à rechercher d'autres zones de survie pendant le stade isotopique 6, et à préciser notre connaissance des climats qui se sont succédé pendant cette période. L'histoire de ces hommes modernes qui ont survécu à la grande glaciation, puis conquis l'Afrique et le monde, doit être précisée, car c'est celle de nos ancêtres.



Les rendez-vous du Muséum
Rencontrez nos chercheurs
Partagez les savoirs...

Entrée libre et gratuite dans la limite des places disponibles.

LES LUNDIS DU MUSÉUM

**Les lundis à 18h
à l'Auditorium de la Grande Galerie
de l'Évolution**

**Cycle de conférences
« La biodiversité dans la ville »**

Lundi 11 octobre
Biodiversité et paysagistes :
le cas des Jardins des Grands Moulins (Paris 13°)
B. Lizet, ethnologue, CNRS / Muséum, P. Perrier et C. Aubel,
paysagistes, agence Ah-Ahpaysagistes.

Lundi 18 octobre
Les bocages pavillonnaires et la construction de la nature
en territoire périurbain
P. Frileux, ethnécologue, ENSP Versailles.

Lundi 25 octobre
Biodiversité et participation citoyenne :
l'exemple du Plan Biodiversité de Paris
L. Baudalet, coordinatrice de l'association «Graine de Jardins»

Lundi 15 novembre
La préservation conjointe de la ressource en eau et de la
biodiversité - Cas de la politique de la Communauté urbaine
Creusot Montceau
P. Notteghem, chargé de mission Développement Durable

Lundi 22 novembre
Biodiversité et continuités écologiques en ville :
regard critique d'un écologue
Ph. Clergeau, écologue, professeur au Muséum

**36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5°
M° Gare d'Austerlitz ou Jussieu**

LES COURS PUBLICS

Assurés par les chercheurs du Muséum,
ils s'adressent à tous

**Les jeudis à 17h30
au Grand Amphithéâtre du Muséum**

**Cycle « L'apport des fossiles dans l'étude
la biodiversité »**

Par P. Tassy, paléontologue, département Histoire de la Terre,
Muséum

Jeudi 25 novembre
Biodiversité - paléobiodiversité : l'impact des fossiles
L'étude des fossiles permet de résoudre des problèmes
d'évolution difficilement maîtrisés à l'aide des seules
formes actuelles.

Jeudi 2 décembre
La paléobiodiversité dans l'ombre des dinosaures
En lien avec l'exposition du même nom, éclairage
sur des formes de vie contemporaines des dinosaures
ou immédiatement postérieures.

Jeudi 9 décembre
Paléobiodiversité : quand la politique s'en mêle
À partir du « Global Biodiversity Assessment »
(ou « Étude Mondiale de la Biodiversité ») publié par
les Nations Unies, quelles sont les propositions avancées
cette année sur la paléontologie dans le futur ?

**57 rue Cuvier, Paris 5°
M° Jussieu**

Détails sur www.mnhn.fr rubrique « Événements »



Des polluants hormonaux

Les perturbateurs endocriniens sont des substances de l'environnement qui agissent comme les hormones dans l'organisme ou en bloquent l'activité. Ils auraient des conséquences néfastes sur la santé. Reste à mieux comprendre leurs modes d'action pour limiter leurs effets.

L'ESSENTIEL

- ✓ Les perturbateurs endocriniens abondent dans l'environnement.
- ✓ Ils modifient l'action des hormones dans les organismes vivants.
- ✓ Dans une cellule, l'hormone se lie à des récepteurs spécifiques qui modifient l'activité de certains gènes.
- ✓ Modifier le transport ou l'action des hormones perturberait les mécanismes de la reproduction, voire les organes reproducteurs et d'autres fonctions physiologiques.

© Shutterstock/Enmes

Depuis 50 ans, les scientifiques ont découvert divers animaux sauvages qui présentaient des anomalies souvent spectaculaires de leurs organes reproducteurs. Un des cas les plus notables est celui des alligators de Floride. Ainsi, Louis Guillette et ses collègues, de l'Université de Floride, avaient constaté une diminution importante du nombre d'alligators et une augmentation des mâles ayant un micro-pénis et diverses anomalies des testicules.

En analysant les sédiments du lac Apopka où vivent ces animaux, les chercheurs ont remarqué que ce lac avait été contaminé accidentellement par des insecticides organochlorés. Ils y ont retrouvé un produit de dégradation du DDT (le dichlorodiphényltrichloroéthane) : le DDE (le dichlorodiphényldichloroéthylène). Cette molécule était-elle responsable des anomalies observées chez les alligators ?

À la fin des années 1990, L. Guillette et ses collègues avaient montré que le sang des alligators du lac Apopka contenait 10 à 20 fois plus de DDE que celui des animaux des lacs voisins non contaminés. Et les œufs d'alligators dans ce lac renfermaient 100 fois plus de pesticides organochlorés que les œufs des autres lacs. En outre, on savait que l'exposition de jeunes alligators à ces mêmes concentrations de pesticides perturbe le développement du

pénis. Ces défauts des organes reproducteurs, associés au produit chimique incriminé, ont orienté les scientifiques vers une explication inédite : les systèmes hormonaux des alligators étaient perturbés.

En effet, on savait que le DDE agit comme certaines hormones, tels les estrogènes qui ont une action féminisante. De plus, le DDE inhibe les androgènes, les hormones responsables de la mise en place des caractères sexuels mâles, tel le pénis. Et les alligators mâles du lac Apopka avaient moins de testostérone, la principale hormone masculine, dans leur sang. Le DDE semblait bien responsable de la féminisation des alligators.

Le DDE est un perturbateur endocrinien. Ce terme regroupe un grand nombre de molécules différentes qui ont la particularité de se comporter comme des hormones dans l'organisme ; soit elles imitent l'action des hormones naturelles, soit elles entrent en compétition avec ces dernières et bloquent (de façon directe ou indirecte) leurs récepteurs – les protéines sur lesquelles les hormones se fixent.

Comment le concept de perturbateurs endocriniens est-il né ? Quel est leur mode d'action dans l'organisme ? Comment s'inscrivent-ils dans les problématiques environnementales et de santé publique ? Examinons ces différents aspects d'une



Marie Tohmé, Jean-Pierre Cravedi et Vincent Laudet

question qui préoccupe de plus en plus les autorités sanitaires des pays industrialisés où les perturbateurs endocriniens sont omniprésents.

Anomalies des organes reproducteurs

De nombreux exemples semblables à celui des alligators du lac Apopka ont été répertoriés. C'est le cas par exemple du phénomène de pseudo-hermaphrodisme décrit pour divers mollusques, tels les bulots : les individus femelles développent des caractères sexuels mâles. Cette anomalie serait due au tributylétain, une substance contenue dans les peintures antisalissures – antifouling – utilisées pour protéger la coque des navires contre les organismes marins qui s'y fixent. On décrit aussi des anomalies de la reproduction ou du développement chez des espèces prédatrices – ours blancs, phoques, rapaces – situées au bout de la chaîne alimentaire et qui accumulent des composés chimiques déséquilibrant les systèmes endocriniens.

Ainsi, en Inde, on a récemment constaté une diminution importante et brutale (97 pour cent en dix ans) des populations de vautours qui consomment les carcasses de bovins. On a attribué cette catastrophe à l'utilisation, chez ces mêmes bovins, d'un

anti-inflammatoire : le diclofenac. Cette molécule, chez les vautours, interrompt le fonctionnement du rein et entraîne la mort.

D'où viennent les perturbateurs endocriniens ? Soit des pesticides, utilisés en grande quantité par l'agriculture et qui persistent dans l'environnement, soit des médicaments, rejetés par les urines des personnes traitées dans l'environnement et les rivières (voir la figure 2). On en trouve aussi dans des plastiques (c'est le cas du bisphénol A et des phtalates), dans des conservateurs, tels les parabènes de nombreux produits cosmétiques, dans divers composés chimiques industriels, tels les polychlorobiphényles (ou PCB, interdits depuis plus de 20 ans, mais qui persistent dans l'environnement) ou les produits polybromés (PBDE), et dans des polluants (les dioxines ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques).

Tous ces produits restent dans l'environnement après leur utilisation par l'homme, parfois durant plusieurs dizaines d'années. Les animaux et l'homme y sont alors exposés. Dans l'organisme, ils modifient d'une façon complexe les réactions des hormones, leur formation, leur transport ou leur dégradation.

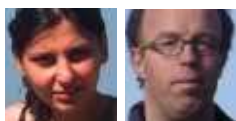
Le concept de perturbateur endocrinien est apparu à la conférence de Wingspread aux États-Unis en 1991 ; on admit alors que les altérations du développe-

1. CET AGRICULTEUR répand un pesticide, lequel contient peut-être des perturbateurs endocriniens, c'est-à-dire des molécules qui risquent de perturber son système hormonal.

ment observées chez diverses espèces sauvages pouvaient être dues à la présence dans leur milieu de substances chimiques. Depuis, de nombreuses équipes de recherche ont étudié comment les contaminants présents dans l'environnement et la chaîne alimentaire modifient les équilibres hormonaux des organismes vivants. Pour lutter contre ces dommages, diverses réglementations commencent à être mises en place (voir l'encadré page 40).

Deux exemples ont permis à la communauté scientifique de comprendre un point essentiel : des modifications, même faibles, des équilibres hormonaux peuvent avoir des effets importants, parfois longtemps après l'exposition. Le premier de ces exemples est une tragédie médicale ; des millions de femmes enceintes (dont 200 000 en France) se sont vu prescrire du distilbène, un produit pharmaceutique contenant du diéthylstilbestrol, qui diminuait le risque de fausses couches. Cette molécule peut se fixer efficacement sur les récepteurs des estrogènes, les hormones sexuelles féminines.

LES AUTEURS



Marie TOHME et Vincent LAUDET travaillent à l'Institut de génomique fonctionnelle de Lyon (CNRS UMR 5242, INRA, Université Claude Bernard Lyon 1, École normale supérieure de Lyon). Jean-Pierre CRAVEDI dirige l'Unité xénobiotiques (UMR 1089 INRA, ENV), à Toulouse.

Mais on s'est aperçu que les fœtus exposés au diéthylstilbestrol présentaient des anomalies des organes sexuels. À l'âge adulte, les femmes avaient un risque important de cancer du vagin et les hommes étaient parfois stériles. Certains adultes n'avaient toutefois pas de problème : seuls les traitements administrés entre la 6^e et la 17^e semaine de grossesse avaient eu des conséquences délétères. C'est à cette période que se forment les organes reproducteurs du bébé à naître. Le distilbène a été retiré du marché dans les années 1970.

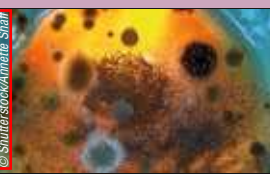
C'est ainsi que l'on découvrit que l'exposition des embryons à des produits imitant les hormones naturelles entraîne des anomalies irréversibles du système reproducteur. Ces troubles sont révélés cliniquement des années après l'exposition. Le système reproducteur est donc sensible à toute variation des concentrations hormonales, et les organismes en développement sont, à certains moments précis que l'on nomme des fenêtres temporelles, très vulnérables à ces modifications.

Le second exemple, découvert et analysé par Frederick vom Saal et son équipe,

à l'Université du Missouri aux États-Unis, n'a *a priori* rien à voir avec les polluants... En étudiant les différents membres d'une même portée de souriceaux, cette équipe a montré que les femelles n'avaient pas, une fois adultes, le même comportement. Si la plupart des femelles s'occupaient de leur progéniture et étaient « timides », un petit nombre d'entre elles étaient agressives et peu attentives à leurs petits.

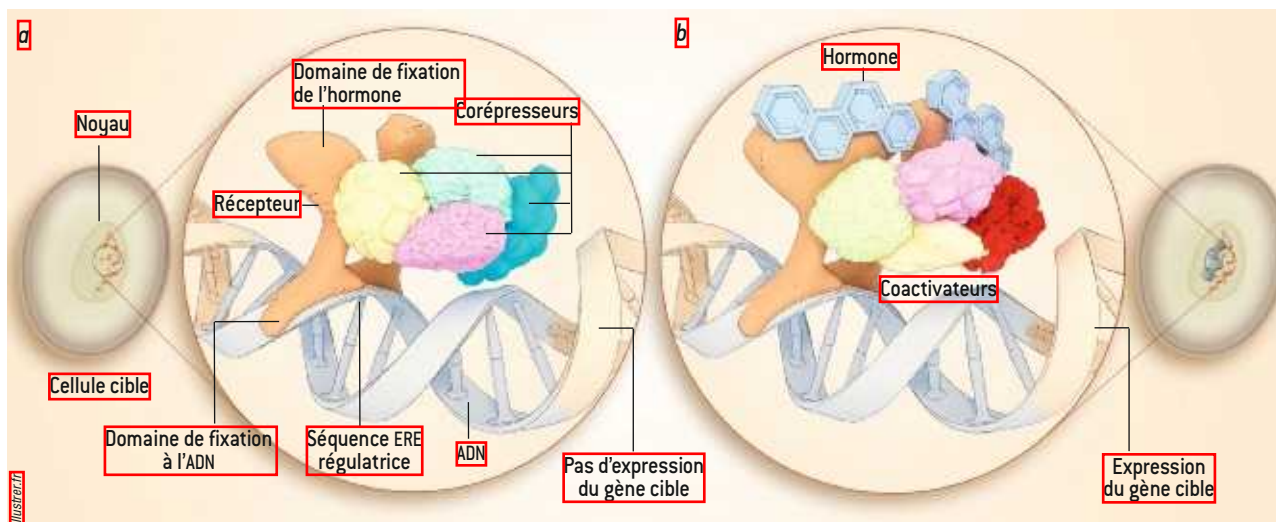
En cherchant pourquoi des souris de laboratoire – génétiquement proches les unes des autres – peuvent avoir des comportements si différents, F. vom Saal a compris que leur position dans l'utérus, pendant la gestation, en est la cause. Une souris porte environ 10 à 12 petits. Les embryons mâles et femelles sont répartis au hasard, et une femelle peut être située entre deux mâles, entre deux femelles ou entre un mâle et une femelle.

F. vom Saal a montré que ce voisinage change la quantité d'hormones à laquelle une femelle est exposée : une femelle située entre deux mâles reçoit une dose plus forte d'androgènes, les hormones mâles, qu'une femelle située

PESTICIDES			POLLUANTS INDUSTRIELS	SUBSTANCES NATURELLES
Herbicides	Fongicides (contre les champignons)	Insecticides		
 2,4-D 2,4,5-T Alachlore Amitrole Atrazine Linuron Metribuzin Nitroféne Trifluraline	Bénomyl Hexachlorobenzène Mancozèbe Manèbe Pentachlorophénol Tributyl étain Vinchlozoline Zinèbe Ziram  Nématocides (contre les vers) Aldicarbe DBCP (dibromochlorophénol)	Carbaryl Chlordécone Dicofol Dieldrine DDT et métabolites Endosulfan Heptachlore et métabolites Lindane Méthomyl Méthoxychlore Mirex Oxychlordane Parathion Pyrethrinoides Toxaphène Transnonachlore 	 Alkylphénol polyéthoxylates Alkylphénols Bisphénol A Cadmium Dioxines et furanes Plomb Mercure PBB PCB (polychlorobiphényles) PBDE (produits polybromés) Phtalates Styrènes	Génistéine (soja) Daïdzéine Coumestrol Zéaralénone 

2. LES PERTURBATEURS ENDOCRINIENS déjà identifiés sont variés. Ces substances, qui persistent souvent dans l'environnement, sont présentes dans les pesticides, des polluants industriels et des substances naturelles, tel le soja qui contient de grandes quantités de génistéine. La voie d'exposition la

plus fréquente pour l'homme est l'alimentation : les revêtements des canettes, des biberons, divers emballages, la contamination directe des produits alimentaires, les plastiques chauffés, etc. Mais l'exposition par voie aérienne – pollution de l'air en ville et dans les habitations – n'est pas négligeable.



3. LES HORMONES STÉROÏDIENNES naturelles – ou leurs analogues de synthèse – se fixent sur des récepteurs présents dans les noyaux cellulaires. Les récepteurs sont des facteurs de transcription, c'est-à-dire des protéines qui contrôlent l'activité des gènes sur lesquels elles se fixent. Ces facteurs (en orange) se fixent par deux sur la séquence dite régulatrice d'un gène. Ils présentent un domaine de liaison à l'ADN qui reconnaît une séquence particulière [nommée ERE pour le récepteur des estrogènes].

Ils contiennent un autre domaine, où se lie l'hormone. Ce domaine change de forme selon que l'hormone est présente ou non. En l'absence d'hormone, la surface du récepteur reconnaît des molécules nommées corépresseurs qui inhibent l'activité du gène (a) ; en présence d'hormone (en bleu), la surface du récepteur fixe des coactivateurs qui activent le gène, permettant la synthèse d'ARN messager (b), celui-ci donnant par exemple une enzyme qui peut avoir des effets féminisants.

entre deux femelles ou entre un mâle et une femelle. Or les androgènes sont responsables de la mise en place des caractères sexuels secondaires mâles, y compris dans le cerveau où ils jouent un rôle important pour le « masculiniser ». Les femelles ayant reçu plus d'androgènes *in utero* sont plus agressives et ont un instinct maternel moins développé.

Les quantités d'hormones qui passent d'un fœtus à l'autre au cours de la grossesse sont infimes, comparées à la quantité produite de façon endogène par chaque embryon. Toutefois, ces petites différences pendant le développement sont suffisantes pour changer le comportement des animaux adultes. On imagine sans peine que des produits présents dans l'environnement et capables d'agir sur les récepteurs hormonaux peuvent avoir des effets importants, surtout lorsque l'exposition a lieu à des périodes critiques du développement. Mais comment les perturbateurs endocriniens agissent-ils ?

Nous ne pouvons comprendre les modes d'action des perturbateurs endocriniens qu'en étudiant ceux des hormones, notamment celles qui contrôlent la reproduction. Ce sont les estrogènes (par exemple l'estradiol), les androgènes (surtout la testostérone) et la progestérone, toutes des hormones stéroïdiennes (les autres étant les glucocorticoïdes et les minéralocorticoïdes). Les stéroïdes dérivent d'un composant lipi-

dique des membranes cellulaires, le cholestérol, qui provient de l'alimentation. Des séries complexes de réactions chimiques – que l'on regroupe sous le nom de stéroïdogenèse –, catalysées par des enzymes, transforment le cholestérol en hormones actives, tels les estrogènes ou les androgènes.

Synthèse et transports des hormones

La stéroïdogenèse a lieu dans différents organes, par exemple les gonades – les testicules ou les ovaires. Certaines de ces voies métaboliques sont très importantes parce qu'elles transforment un stéroïde inactif du point de vue hormonal en une molécule biologiquement active, c'est-à-dire capable de se fixer sur un récepteur spécifique. D'autres étapes convertissent une hormone active en une autre hormone active, mais en se fixant sur un récepteur différent. Par exemple, l'aromatase change des androgènes en estrogènes.

Les molécules impliquées dans la stéroïdogenèse représentent une première série de cibles pour les perturbateurs endocriniens (voir l'encadré page 37) ; en effet, les enzymes transformant ces stéroïdes ont un site dit actif, c'est-à-dire une séquence d'acides aminés qui reconnaît le substrat (la molécule à transformer) et catalyse sa modi-

fication chimique. Toute molécule chimique qui peut prendre la place du substrat naturel perturbe la production normale des hormones actives. C'est par exemple le cas de l'atrazine, un herbicide souvent utilisé dans la culture du maïs, qui contamine les eaux souterraines ou de surface. Par des mécanismes complexes, l'atrazine active la synthèse de l'aromatase, ce qui engendre une surproduction d'estrogènes et des effets féminisants.

Les hormones fabriquées par un tissu – par exemple la testostérone dans les testicules – sont transportées par le sang vers leurs tissus cibles, parfois éloignés. Les androgènes agissent sur les testicules, mais aussi sur la prostate, le cerveau, les muscles et à d'autres endroits de l'organisme. Comme ces hormones ne sont solubles que dans les lipides, elles sont transportées sur leurs sites d'action sous forme de complexe avec des protéines de transport.

Arrivées à destination, les hormones stéroïdiennes agissent *via* des récepteurs situés dans le noyau des cellules. Pour ce faire, elles rentrent dans la cellule en franchissant la bicouche lipidique qui forme l'enveloppe de chaque cellule. Ce transport fait intervenir d'autres protéines. Dans la cellule, les hormones sont prises en charge par des protéines spécifiques jusqu'à leur récepteur. Ces protéines intracytoplasmiques permettent de « cibler » une hormone donnée vers un récepteur

✓ SUR LE WEB

Le réseau européen Cascade :
<http://www.cascadenet.org/>

Le site e.hormone :
<http://e.hormone.tulane.edu/>

<http://nurexbase.prabi.fr>

précis et peuvent stocker temporairement une hormone, alors utilisée selon les besoins.

Tous les acteurs nécessaires à la distribution des hormones dans l'organisme contiennent un site de fixation des hormones. Ces protéines sont le plus souvent peu spécifiques, c'est-à-dire qu'elles se lient à n'importe quelle hormone stéroïdienne (les estrogènes, les androgènes ou les corticoïdes). Des molécules ressemblant aux hormones peuvent donc « profiter » aussi de ces transporteurs.

On a découvert il y a quelques années que les PCB sont des perturbateurs de la fonction thyroïdienne (la thyroïde est une glande produisant des hormones qui interviennent dans la croissance et le développement du cerveau). Les PCB représentent un bon exemple de la multitude des voies d'action des perturbateurs endocriniens ; ils peuvent entrer en compétition avec les hormones thyroïdiennes vis-à-vis de leurs protéines de transport sanguines, telle la transthyrétine chez le rat. Mais, chez l'homme, un autre transporteur des hormones thyroïdiennes est utilisé, la globuline, pour lequel les PCB ont beaucoup moins

d'affinité. En d'autres termes, les PCB se lient moins bien à la globuline qu'à la transthyrétine ; ils ne modifient donc pas l'efficacité de la protéine de transport humaine.

En fait, ce ne sont pas tant les PCB eux-mêmes, mais plutôt leurs métabolites, c'est-à-dire leurs produits de transformation par l'organisme, qui ont des effets perturbateurs. Ces métabolites modifient non seulement la fonction thyroïdienne, mais aussi celle des estrogènes : contrairement aux PCB, ils activent les récepteurs des estrogènes. De même, d'autres métabolites se fixent sur les récepteurs des corticoïdes et perturbent le fonctionnement des glandes surrénales (situées sur les reins).

Qui plus est, diverses enzymes de l'organisme dégradent les hormones, mais les vitesses et l'efficacité de ces réactions métaboliques varient. Les perturbateurs endocriniens sont eux-mêmes capables de modifier l'efficacité de ces systèmes enzymatiques inactivant les hormones. Un perturbateur ralentissant la dégradation d'une hormone augmente la concentration ou la durée d'action de cette dernière : ce perturbateur stimule ou

le collège universcience
universcience.fr

Symbiose : unis pour la vie
Cité des sciences et de l'industrie
—
5 octobre à 18 h 30
L'entraide entre espèces
—
12 octobre à 18 h 30
Plantes et champignons
—
19 octobre à 18 h 30
La symbiose dans le monde animal

Biodiversité : drôles de bêtes
Palais de la découverte
—
12 octobre à 15 h
L'inventaire de la faune et de la flore sur les terrains du Conservatoire du littoral
—
9 novembre à 15 h
Les limaces de mer
—
16 décembre à 15 h
La biodiversité sur les terrains du Conservatoire outre-mer

Le clonage animal à l'épreuve de l'éthique
Cité des sciences et de l'industrie
Conférence Campus Condorcet
—
21 octobre à 18 h 30

En partenariat avec Conservatoire du littoral

Coorganisé par

Avec le soutien de

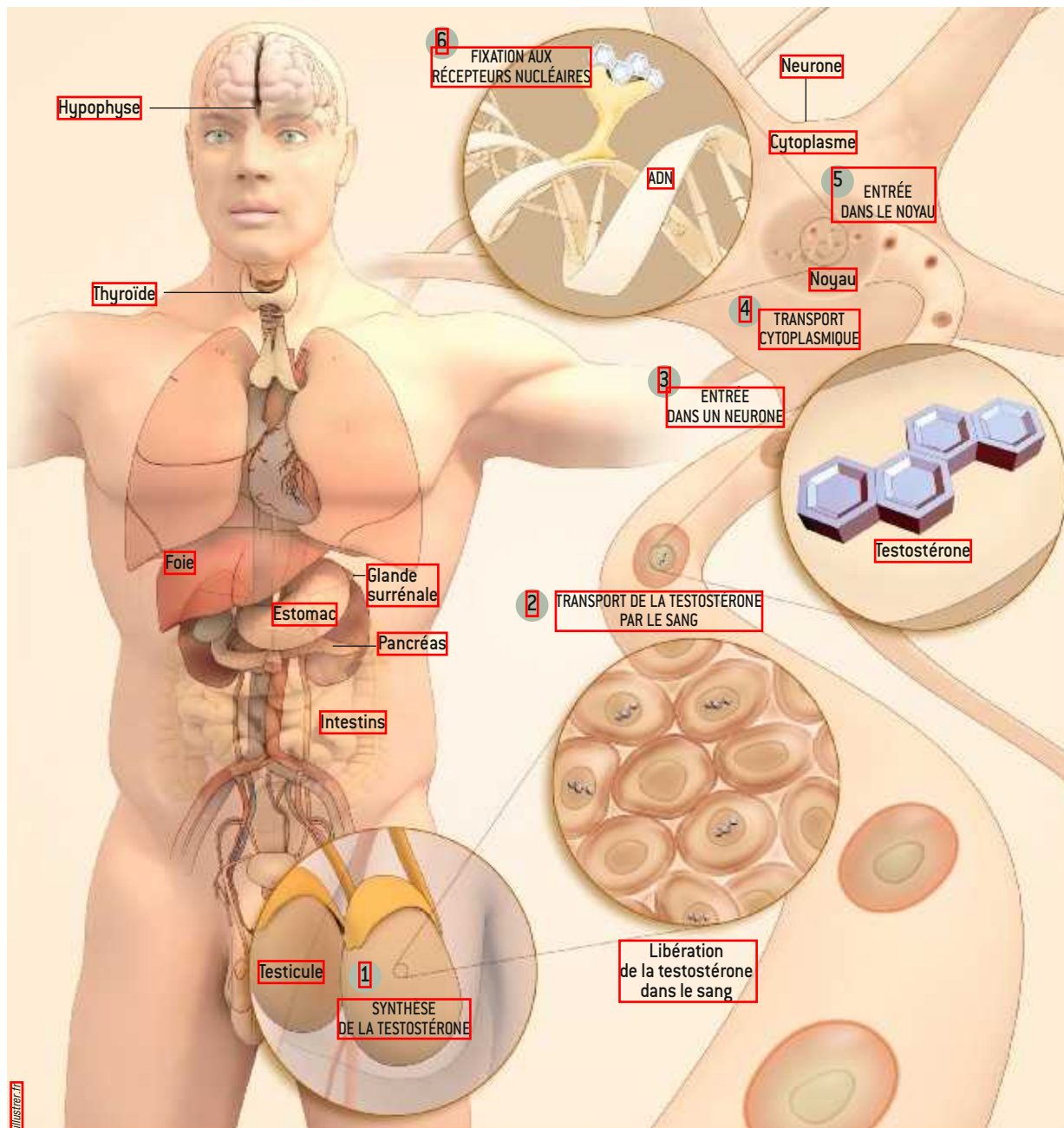
LE TRAJET DES HORMONES... ET DES PERTURBATEURS

Les hormones sont fabriquées par des glandes endocrines. Par exemple, l'hypophyse sécrète entre autres l'hormone sexuelle folliculo-stimulante (FSH); la thyroïde libère les hormones thyroïdiennes; les ovaires et les testicules produisent des hormones sexuelles (les œstrogènes, la progestérone et les androgènes); et le pancréas, l'estomac, le foie, les surrénales et les intestins sécrètent d'autres types d'hormones.

Ces glandes libèrent dans le sang ces hormones, qui agissent sur différents tissus cibles, souvent situés à distance du site de production. Elles y modifient l'activité de gènes particuliers.

Prenons l'exemple de l'hormone sexuelle mâle, la testostérone, fabriquée dans les testicules. La testostérone agit sur de nombreux organes cibles, tels le cerveau, les muscles ou la prostate. Pour ce faire, elle doit pénétrer dans le noyau des cellules de l'organe cible. Prenons

l'exemple des neurones dans le cerveau. La testostérone est véhiculée dans le sang par diverses protéines dites de transport. Arrivée dans le cerveau, une autre protéine de transport lui fait traverser la membrane cellulaire. Dans le cytoplasme du neurone, elle est prise en charge par des protéines de transport intracellulaires qui la font pénétrer dans le noyau; ayant atteint son but – le noyau des neurones –, elle se lie à ses récepteurs nucléaires spécifiques. Les perturbateurs endocriniens peuvent entrer en compétition avec les hormones naturelles soit en prenant leur place, soit en perturbant leur fixation sur les différentes protéines de transport. Ils peuvent perturber chacune des phases du trajet: la synthèse de l'hormone naturelle (1), son transport dans le sang (2), l'entrée dans la cellule cible (3), le transport dans le cytoplasme (4), l'entrée dans le noyau (5), la liaison aux récepteurs nucléaires (6).



prolonge l'effet de l'hormone. Par exemple, certains métabolites des PCB inhibent des enzymes, qui inactivent l'estradiol (un estrogène) et favorisent son élimination. La quantité d'estradiol présente est alors plus importante : ces métabolites ont des effets féminisants.

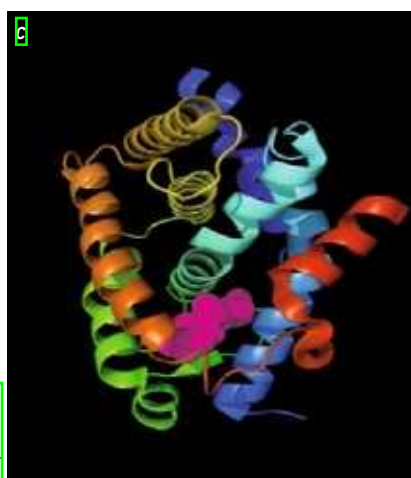
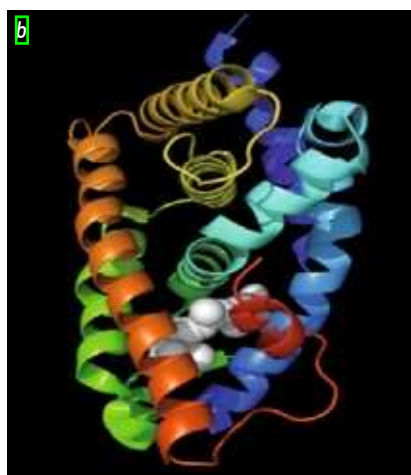
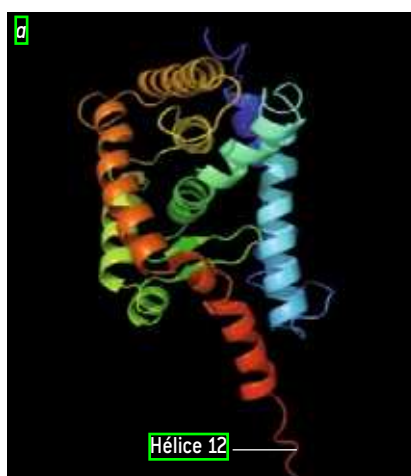
Après ces différentes étapes, les hormones arrivent sur leur site d'action essentiel : le noyau. Elles y régulent la transcription, c'est-à-dire l'activité des gènes, en se fixant sur des récepteurs qui appartiennent à une famille de protéines, les récepteurs nucléaires d'hormones ; ces derniers sont en effet situés dans le noyau des cellules et ce sont des facteurs de transcription. En présence du ligand qui lui est spécifique (la molécule qui se fixe sur le récepteur, et qui peut être une hormone, un facteur de croissance, etc.), le récepteur fixé sur l'ADN active certains gènes que l'on nomme gènes cibles. En absence de cette hormone, il n'active pas la transcription de ces gènes cibles, parfois même, il l'interdit (voir la figure 3).

Par exemple, les estrogènes activent la transcription des gènes de la vitellogénine chez les oiseaux, les amphibiens ou les poissons, de sorte que les femelles produisent des œufs riches en réserves énergétiques. Les estrogènes régulent aussi chez la femme de nombreux gènes qui contrôlent la prolifération cellulaire dans la glande mammaire ou les fonctions de reproduction dans les ovaires ou le cerveau.

Les récepteurs hormonaux : des cibles majeures

Mais comment les récepteurs des stéroïdes activent-ils de façon spécifique certains gènes ? Chaque récepteur est constitué d'un domaine fonctionnel reconnaissant l'hormone qui lui est spécifique, et d'un autre domaine qui se fixe sélectivement sur son gène cible.

Le domaine de fixation sur l'ADN est la signature des récepteurs nucléaires : il est très conservé d'un récepteur à l'autre et permet la fixation des récepteurs sous forme de dimères (les récepteurs se lient à l'ADN associés par deux). Chaque récepteur reconnaît une séquence d'ADN spécifique. Ainsi, le récepteur des estrogènes ne se fixe que sur la séquence AGGTCA, nommée ERE, alors que celui des glucocorticoïdes reconnaît la séquence AGAACA, nommée GRE (où A



4. LE DOMAINE DE FIXATION de l'hormone sur son récepteur nucléaire peut prendre trois conformations différentes. Sa structure en l'absence d'hormone montre une série d'hélices entrecroisées avec notamment l'hélice 12 (en rouge) située à l'extrémité du domaine (a). Quand l'hormone (b, en blanc) est présente, elle est recouverte par l'hélice 12. Un perturbateur endocrinien peut prendre la place de l'hormone dans la poche (c, en rose). Quand elle est volumineuse, cette molécule empêche la fermeture de l'hélice 12 qui occupe une autre position : la surface du récepteur est encore modifiée.

est le nucléotide adénine de l'ADN, T la thymine, G la guanine et C la cytosine).

Voilà comment un récepteur stéroïdien reconnaît des gènes spécifiques. Mais qu'en est-il de sa liaison au ligand ? Elle a lieu dans un grand domaine proche de l'extrémité de la protéine-récepteur. Ce domaine contient notamment une poche où se fixe le ligand, ce qui modifie la conformation du récepteur. Grâce à la détermination de la structure tridimensionnelle de ce domaine, obtenue par des méthodes de radiocristallographie aux rayons X, on a montré comment se déroule cette fixation. D'abord, la poche centrale, hydrophobe, fixe le ligand. La forme, la taille et la composition en acides aminés de chaque poche varient d'un récepteur à l'autre, ce qui assure la spécificité de la reconnaissance.

La conformation du récepteur et, par conséquent, son activité changent selon que l'hormone est présente ou absente (voir la figure 4). Les perturbateurs endocriniens modifient également la conformation de ces récepteurs. Même si la reconnaissance de l'hormone naturelle devrait être spécifique, les perturbateurs endocriniens parviennent à se loger dans la poche de fixation du ligand, à la place de l'hormone naturelle. Notons toutefois que l'affinité du perturbateur pour le site actif est inférieure à celle de l'hormone naturelle. Par exemple, le bisphénol A se fixe sur les récepteurs des estrogènes avec une affinité environ 10 000 fois inférieure à celle du ligand naturel, le 17 bêta-estradiol. Pourtant, même si cette différence semble importante, le bisphénol A se lie au récepteur et provoque le changement de conformation quand l'hormone est présente en faible quantité ou absente.

Cela a été étudié dans le cas des récepteurs des estrogènes. On a examiné la structure de leur domaine de fixation en présence de nombreux ligands : le ligand naturel, l'estradiol, le diéthylstilbestrol, l'agent actif du distillène, la génistéine, le principal antioxydant du soja qui est aussi une molécule estrogénique, ou le tamoxifène, un antagoniste des estrogènes utilisé dans le traitement du cancer du sein. La conformation du récepteur change avec chaque ligand. Dans certains cas, la conformation adoptée déclenche l'activation des gènes cibles. Au contraire, dans le cas du tamoxifène, le ligand est si volumineux qu'il empêche le replie-

ment correct de la molécule : les gènes cibles ne sont pas activés.

De surcroît, il existe de nombreux coactivateurs qui modulent l'efficacité des réactions d'activation des gènes. Et comme les coactivateurs diffèrent d'un organe à l'autre, certains ligands engendrent des réactions plus ou moins efficaces selon les organes. De fait, les pharmacologues, qui tentent de développer des médicaments de plus en plus ciblés, exploitent ces phénomènes. Et les perturbateurs endocriniens aussi ! C'est pour cette raison que des molécules différentes ont des effets variés, même si comme le bisphénol A et la génistéine, elles reconnaissent les mêmes récepteurs.

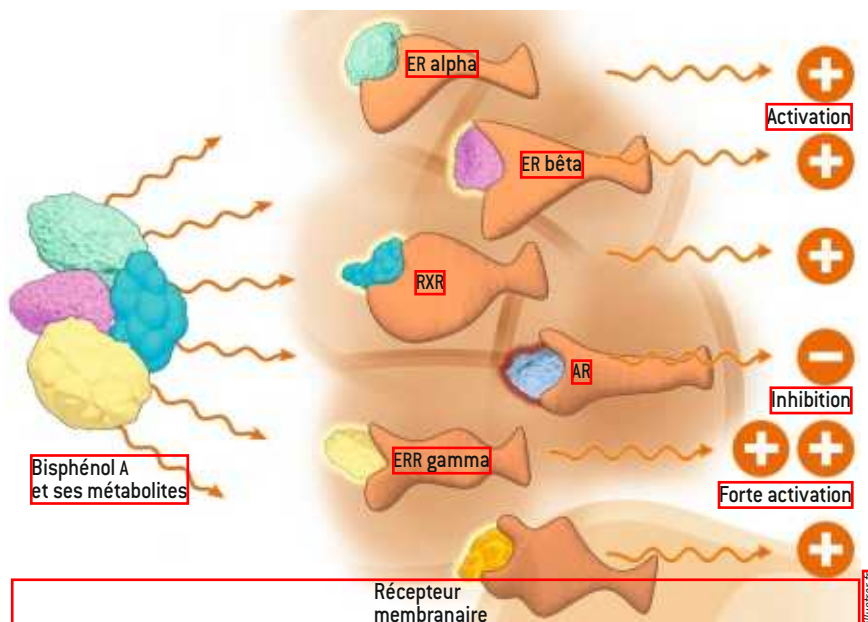
En se fixant sur un même récepteur, ces molécules ont des effets spécifiques, puisqu'elles ont des affinités différentes pour leur récepteur et une répartition variable dans les tissus, et qu'elles provoquent divers changements de conformation. On comprend mieux la diversité de leurs effets !

Des perturbateurs qui se fixent sur plusieurs récepteurs

On a même constaté que les perturbateurs endocriniens reconnaissent souvent plusieurs récepteurs. Au début, ce sont surtout les récepteurs des estrogènes et, dans une moindre mesure, ceux des androgènes qui ont été étudiés. Mais depuis quelques années, plusieurs initiatives ont diversifié les études sur les mécanismes d'action des perturbateurs endocriniens. Les acteurs du réseau européen *Cascade* dont nous faisons partie cherchent à savoir si ces molécules agissent sur les autres récepteurs nucléaires d'hormones.

Il existe 48 gènes codant des récepteurs nucléaires dans le génome humain : les récepteurs des stéroïdes, des hormones thyroïdiennes, mais aussi des rétinoïdes ou des dérivés des acides gras. Dans le foie, certains récepteurs nucléaires ont même pour rôle de reconnaître des molécules étrangères toxiques tels les xénobiotiques ; ils déclenchent alors des réactions de dégradation de ces molécules.

Revenons au cas du bisphénol A. Cette molécule est un ligand de faible affinité des deux récepteurs des estrogènes ER alpha et ER bêta. Mais on a montré qu'il se fixe aussi sur le récepteur des andro-



5. LE BISPHÉNOL A EST UN PERTURBATEUR ENDOCRINIEN. Il agirait (lui ou ses métabolites) dans l'organisme en se fixant sur différents récepteurs : les récepteurs ER alpha et ER bêta des estrogènes sur lesquels se fixe l'hormone naturelle (il activerait ces récepteurs) ; un autre récepteur, ERR gamma, dont la fonction est inconnue, mais pour lequel le bisphénol A présente une forte affinité ; le récepteur des androgènes – AR – dont il bloquerait l'activité ; le récepteur nucléaire RXR activé aussi par la vitamine A ; et même certains récepteurs membranaires. Et il reste probablement d'autres cibles du bisphénol A à découvrir... La plupart des perturbateurs endocriniens ont de multiples effets, car, comme le bisphénol A, ils se lient à plusieurs récepteurs.

gènes, qu'il bloque, avec une affinité plus de 1000 fois inférieure à celle du ligand naturel. Depuis peu, on sait également que le bisphénol A est un ligand du récepteur ERR gamma – un autre récepteur proche de ceux des estrogènes dont le rôle *in vivo* n'est pas connu –, mais avec une affinité forte, proche de celle d'un ligand classique, tel le 17 bêta-estradiol sur le récepteur ER alpha (voir la figure 5).

Cette observation est intéressante, car le récepteur ERR gamma partage de nombreux gènes cibles avec les récepteurs ER alpha et ER bêta. Cela expliquerait en partie certains effets des perturbations endocrines dues au bisphénol A qui ne sont pas compatibles avec sa faible interaction avec les récepteurs ER. Et d'autres résultats laissent penser que le bisphénol A ou ses dérivés (par exemple, le tétrabromobisphénol A) interagiraient avec la voie de signalisation des hormones thyroïdiennes, même si une fixation du bisphénol A sur le récepteur des hormones thyroïdiennes est exclue. Et la liste n'est pas close... Des dérivés du bisphénol A semblent agir sur les récepteurs PPAR, des récepteurs nucléaires des acides gras et de leurs dérivés.

Cette liste de récepteurs possibles pour le bisphénol A peut dans une certaine

BIBLIOGRAPHIE

M.-H. Perrard et al., *Analyse de la spermatogenèse ex vivo. Application à l'analyse de la toxicité testiculaire*, *Médecine/Sciences*, vol. 26, pp. 305-310, 2010.

M. M. Tabb et B. Blumberg, *New modes of action for endocrine-disrupting chemicals*, *Molecular Endocrinology*, vol. 20, pp. 475-482, 2008.

J.-P. Cravedi et al., *Le concept de perturbation endocrinienne et la santé humaine*, *Médecine/Sciences*, vol. 23, pp. 198-204, 2007.

J. A. McLachlan, *Environmental signaling: what embryos and evolution teach us about endocrine disrupting chemicals*, *Endocrine Reviews*, vol. 22, pp. 319-341, 2001.

T. Colborn, J. P. Meyers et D. Dumanoski, *Our Stolen Future: Are We Threatening Our Fertility, Intelligence and Survival? A Scientific Detective Story*, Plume Books, 1997.

LE RÈGLEMENT EUROPÉEN REACH

En 1999, l'Union européenne définit un perturbateur endocrinien comme « une substance ou un mélange exogène altérant les fonctions du système endocrinien et induisant donc des effets nocifs sur la santé d'un organisme intact, de ses descendants ou sous-populations ». Depuis, cette notion est apparue dans la réglementation internationale, et le règlement euro-

péen REACH, qui est entré en application le 1^{er} juillet 2007 et encadre l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques en Europe. Elle indique que certaines substances ayant des effets graves et irréversibles sur l'être humain ou l'environnement, tels les perturbateurs endocriniens (au même titre que les substances cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la repro-

duction), devront faire l'objet d'une autorisation avant toute utilisation. L'Union européenne lance des programmes de surveillance chargés d'estimer l'exposition aux perturbateurs endocriniens classés prioritaires et d'en évaluer les effets. Plusieurs mesures ont été prises à l'échelle internationale visant à interdire ou limiter l'usage de perturbateurs endocriniens avérés. C'est le cas de pes-

ticides tels que l'atrazine, ou encore des phtalates présents dans les jouets ou articles de puériculture, ou plus récemment du bisphénol A dans les biberons. Cependant, bien que l'OCDE recherche des méthodes d'évaluation des perturbateurs endocriniens, les tests ou les protocoles expérimentaux qui permettent de répertorier les perturbateurs endocriniens ne sont pas encore tous au point.

mesure être dressée pour de nombreux perturbateurs endocriniens. De fait, on sait aujourd'hui que ces perturbateurs interviennent dans de nombreuses voies physiologiques et qu'une même molécule peut agir sur différents récepteurs. D'où la complexité de leurs effets.

Qui plus est, on découvre que les perturbateurs agissent au cours du développement. Nous venons ainsi de mettre en évidence les conséquences de la génistéine sur le développement précoce du poisson-zèbre : la génistéine engendre la mort de certaines cellules au cours du développement du poisson, ce qui entraîne des anomalies développementales. Ce mécanisme a été montré pour des concentrations en génistéine importantes, bien supérieures aux doses d'exposition de l'homme. Toutefois, il révèle la gamme des effets possibles de ces molécules.

Ces effets développementaux sont préoccupants : chez l'homme, le fœtus est exposé à différents perturbateurs endocriniens qui passent dans la circulation materno-fœtale, et les enfants sont souvent exposés à de plus fortes doses que les adultes. Très récemment, des liens, encore ténus et qui devront être confirmés, ont été évoqués entre une perturbation endocrinienne et les phénomènes d'allergie croissants ou « l'épidémie » d'obésité des pays industrialisés.

Bruce Blumberg, de l'Université de Californie à Irvine, propose que des molécules, qui interféreraient avec le métabolisme lipidique et *via* des récepteurs nucléaires, auraient un effet métabolique important prédisposant à l'obésité. Bien sûr, d'autres causes (le style de vie sédentaire, l'alimentation trop riche, certains facteurs génétiques) expliquent l'augmentation importante de l'obésité, mais

il est possible que les perturbateurs endocriniens présents dans l'environnement jouent également un rôle.

Tous ces mécanismes d'action montrent qu'une substance chimique est capable, même à faible concentration, d'avoir un impact sur la régulation hormonale et sur diverses fonctions physiologiques. L'étude de ces substances pose de nombreuses difficultés, car, dans la nature, les espèces sont exposées à de nombreux polluants.

Du laboratoire à l'homme

Par exemple, l'exposition de poissons à des effluents de stations d'épuration peut provoquer un changement de sexe ou la production de vitellogénine chez les individus mâles (alors que c'est une protéine de l'œuf synthétisée par les femelles). Ces effets sont d'autant plus importants que les poissons sont proches de la source de pollution. La cause de cette féminisation est souvent multifactorielle, c'est-à-dire associée à plusieurs substances chimiques. Parmi celles-ci, figurent des hormones naturelles (l'estradiol) ou de synthèse (l'éthynylestradiol), des sous-produits de médicaments (les pilules contraceptives), des polluants industriels, agricoles ou ménagers (les alkylphénols, les pesticides), des phytoestrogènes (le sitostérol). Cette exposition à de multiples agents rend complexe l'établissement d'un lien de cause à effet entre contaminants, perturbation endocrinienne et anomalie de la reproduction.

Chez l'homme, face à la diversité des modes de vie, des expositions et des facteurs génétiques, il est encore plus compliqué d'établir un lien entre une molécule et un effet. L'extrapolation des résultats

de laboratoire à l'espèce humaine l'est tout autant. La plupart des animaux de laboratoire (la souris, le rat, les poissons, les amphibiens, tel le xénope) ont une durée de vie courte et une physiologie de la reproduction différente de celle de l'homme. Comment comparer une souris traitée deux ans par du bisphénol A à une femme exposée pendant plus de 30 ans qui a pris des médicaments, telle la pilule, mais a aussi eu des enfants ?

Toutefois, outre le distillibène, quelques exemples liés à des expositions professionnelles montrent que des substances chimiques, *via* des mécanismes de perturbation endocrinienne, ont des effets délétères sur la santé. Parmi ces substances, figure le dibromochlorophénol, un nématocide (tuant les vers) qui a rendu stériles plus de 11 000 ouvriers des bananeraies du Costa Rica et du Nicaragua au cours des années 1970-1990. Ce produit toxique pour la reproduction entraîne une augmentation (proportionnelle à l'exposition) d'une hormone sexuelle, l'hormone folliculo-stimulante, ce qui réduit la qualité et la quantité du sperme. De plus, le chlorodécone, un insecticide organochloré à activité estrogénique, également utilisé dans les bananeraies, a provoqué une diminution du nombre et de la mobilité des spermatozoïdes chez les salariés chargés de sa fabrication (voir la figure 1).

Il est aujourd'hui avéré que les perturbateurs endocriniens ont des conséquences délétères sur divers animaux. Qu'en est-il chez l'homme ? La question continue à faire débat, mais, même si les effets chez l'homme restent à confirmer, des précautions s'imposent tant que les chercheurs n'auront pas précisé la nature et l'étendue des dégâts causés par ces molécules et leurs modes d'action.

Pour être au top cette année

Offre spéciale étudiants

Pour la Science (12 numéros)
+ Les Dossiers (4 numéros)

1 an

64 €



Soit 37 %
de réduction

POUR LA
SCIENCE

Recevez chaque mois votre magazine en version papier et consultez sa version numérique en format PDF sur www.pourlascience.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

Vous bénéficiez en tant qu'étudiant du prix le plus bas du marché et vous bénéficiez des avantages du numérique (vous disposez du numéro en cours en pdf gratuit, vous retrouvez en plus l'intégralité de votre magazine en ligne et téléchargez tous les articles correspondants à votre abonnement).

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** (12 n°s et leur version numérique) + **les Dossiers** (4 n°s et leur version numérique),

1 an • **64 €** au lieu de ~~102,50 €~~ Participation aux frais de port : Europe (hors France) 16 € par an, autres pays 35 € par an.

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** seul (12 n°s et leur version numérique)

1 an • **47 €** au lieu de ~~74,70 €~~ Participation aux frais de port : Europe (hors France) 12 € par an, autres pays 25 € par an.

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** version web (12 n°s)

1 an • **40 €**

Important : Pour profiter de cette offre, merci de joindre la photocopie de votre carte d'étudiant ou un justificatif de votre profession pour les professeurs.

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations de **Pour la Science**

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations des partenaires commerciaux de **Pour la Science**



Mes coordonnées (à remplir) :

Nom, prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. **: _____

E-mail **: _____

Je règle par :

☐ Chèque à l'ordre de **Pour la Science**

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte _____

Date d'expiration _____

Code de sécurité *** _____

Signature obligatoire

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffit de nous prévenir par simple courrier.
* prix en kiosque ** facultatif *** Merci d'inscrire les 3 chiffres figurant au dos de votre carte

PLS396

Le bisphénol A : un danger pour la santé ?

Heather Patisaul

Un composant des plastiques, le bisphénol A, modifie, chez le rat, l'organisation de certaines régions cérébrales et perturbe la reproduction. Il n'est pas avéré qu'il en soit ainsi chez l'homme, mais, principe de précaution oblige, mieux vaut limiter l'exposition à cette substance.

L'ESSENTIEL

✓ La plupart des plastiques et des résines de polycarbonates contiennent du bisphénol A.

✓ C'est un perturbateur endocrinien : il altère l'effet des hormones dans l'organisme.

✓ Chez le rat, le bisphénol A perturbe la reproduction et le développement cérébral.

✓ L'homme en ingère de faibles quantités. Même si l'on ne peut transposer directement à l'homme les résultats obtenus en laboratoire, il est recommandé de limiter l'exposition au bisphénol A.

L'industrie produit de grandes quantités de plastiques, plus de 45 milliards de tonnes par an pour les États-Unis, l'Europe arrivant juste derrière et la France étant le cinquième producteur mondial de matières plastiques. De quoi ces plastiques sont-ils constitués ? Sont-ils dangereux pour la santé ?

En France, on trouve désormais sur les plastiques de puériculture, notamment les biberons, la mention « sans bisphénol A ». Aux États-Unis, cet étiquetage existe aussi sur les bouteilles d'eau en plastique. Cette mention résulte de l'inquiétude des consommateurs : selon des études scientifiques, le bisphénol A, un constituant de nombreux plastiques durs, serait dangereux pour l'appareil reproducteur de l'homme, car il perturbe l'action des hormones. Le bisphénol A est un perturbateur endocrinien.

Les industriels du plastique et l'Administration américaine de l'alimentation et des médicaments, FDA, affirment que le bisphénol A n'est pas dangereux aux

concentrations auxquelles l'homme est exposé. Mais en septembre 2008, le Programme américain de toxicologie a conclu qu'il existait « une certaine inquiétude » concernant des effets indésirables sur « le cerveau, le comportement et la prostate chez les fœtus, les nourrissons et les enfants ». Cette annonce poussa les membres du Congrès américain à faire pression sur la FDA pour qu'elle réalise une nouvelle étude. Elle est en cours.

En France, l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (l'AFSSA) s'est saisie du dossier en octobre 2009 pour une nouvelle expertise. Dans ses conclusions, l'AFSSA ne dit pas que le bisphénol A est dangereux, ni qu'il doit être interdit, mais préconise de réaliser de nouvelles recherches et d'avertir les consommateurs sur des précautions d'usage.

Ces messages prudents, voire contradictoires, sur l'innocuité du bisphénol A soulignent combien l'évaluation du risque pour l'homme est difficile. Pourquoi les agences de santé ne sont-elles pas parvenues à un consensus ? D'abord parce qu'il n'existe pas de directives claires quant à la quantité et la nature des preuves scientifiques nécessaires pour juger des risques dus aux perturbateurs endocriniens. De surcroît, on ignore dans quelle mesure on peut extrapoler à l'homme les résultats obtenus chez l'animal et, enfin, il est évidemment impossible d'évaluer ces risques dans la population au moyen d'expériences contrôlées.

Nous résumerons ici ce que nous savons sur le bisphénol A. Nous verrons qu'il est difficile d'assurer que cette substance est dangereuse pour l'homme. Mais la production et l'exposition au bisphénol A ne cessant d'augmenter, nous pensons qu'il est nécessaire de faire le point sur les acquis et les questions ouvertes. D'autant que le bisphénol A n'est pas le seul perturbateur endocrinien ; des milliers de produits chimiques auraient des effets comparables.

Le bisphénol A omniprésent

Le bisphénol A représente deux pour cent des produits chimiques, en termes de volume de production. C'est une molécule qui rend les plastiques de type polycarbonates plus durs et plus résilients, c'est-à-dire qu'ils résistent mieux aux chocs et retrouvent leur forme initiale après une déformation. Les polycarbonates sont généralement transparents. Le bisphénol A est aussi présent dans les résines époxy qui recouvrent l'intérieur des boîtes de conserve métal-

liques. Et il est utilisé dans d'innombrables produits, tels les disques compacts, les lunettes, les conduites d'eau en polycarbonate, les dispositifs médicaux et les matériaux de soins dentaires (voir la figure 2).

Le bisphénol A passe facilement des contenants des produits alimentaires aux contenus, notamment quand ils sont chauffés, y compris dans un four à micro-ondes. Des scientifiques américains ont estimé que plus de 92 pour cent des Américains ont des traces de bisphénol A dans leur organisme, et les enfants présentent les concentrations les plus élevées (voir la figure 3). C'est donc par l'alimentation que l'homme est le plus exposé au bisphénol A.

C'est un perturbateur endocrinien, c'est-à-dire, selon l'Agence américaine de protection de l'environnement, une substance ou un mélange chimique exogène qui modifie la structure ou les fonctions du système endocrinien – l'ensemble du système hormonal de l'organisme – et qui provoque des effets indésirables chez des individus et leur progéniture, ou sur des populations entières.

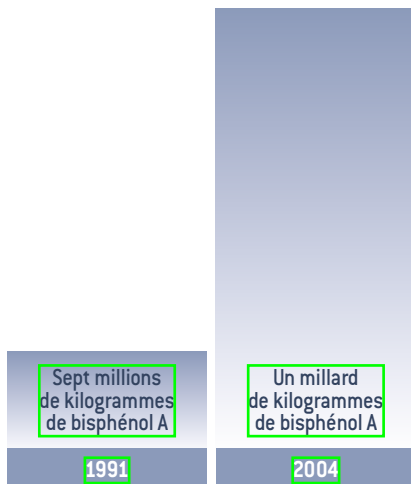
Les hormones ont de nombreuses fonctions ; elles sont notamment capables de stimuler ou de bloquer la transcription des gènes, la première étape de la synthèse des protéines, les molécules essentielles à la vie. Les perturbateurs endocriniens interfèrent avec ces mécanismes génétiques. Le moment de l'exposition est un facteur critique, car la vulnérabilité des individus varie selon l'âge. Chez un adulte, où les organes sexuels sont fonctionnels, une perturbation du système hormonal serait réversible à partir du moment où l'exposition à une telle substance cesserait. Mais ce ne serait pas le cas chez le fœtus en développement ou le jeune enfant. Ces derniers sont particulièrement sensibles aux effets des perturbateurs endocriniens.

Au cours du développement, les hormones façonnent le cerveau et les organes reproducteurs qui déterminent la physiologie et les comportements sexuels. Cela est surtout vrai pendant la grossesse, la période postnatale, voire à l'adolescence. Une perturbation des mécanismes de développement peut modifier les circuits neuroendocriniens du cerveau (différents selon le sexe), les cellules des organes reproducteurs, l'âge de la puberté et la capacité de reproduction. Le bisphénol A, même aux concentrations relativement faibles auxquelles sont exposés les hommes, aurait ces effets chez les rats et les souris de laboratoire. À ces concentrations, a-t-il ou non des effets sur l'homme ?

Le bisphénol A a, sur la reproduction des rongeurs étudiés en laboratoire, des effets qui ne sont pas sans rappeler certaines constatations sanitaires récentes. Ainsi, une

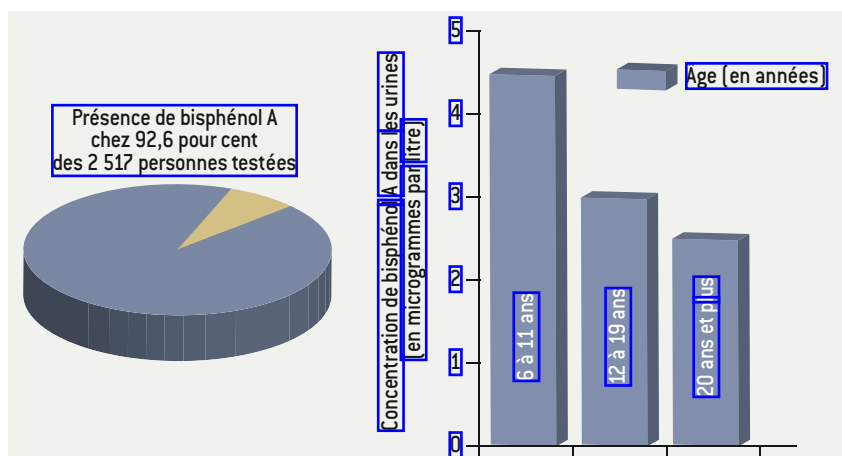
1. CE BIBERON et ces jouets pour nourrissons contiennent du bisphénol A, un produit chimique utilisé dans les plastiques en polycarbonates. Le bisphénol A est un perturbateur endocrinien : il est capable d'interférer avec le fonctionnement normal des hormones dans l'organisme.





2. LE BISPHÉNOL A EST ABONDANT. Aux États-Unis, la production est passée de sept millions de kilogrammes au début des années 1990 à un milliard de kilogrammes en 2004. Le bisphénol A est présent entre autres dans les biberons, les boîtes en plastique pour aliments, les boîtes de conserve, des matériaux de soins dentaires. Les nourrissons et les enfants sont les plus exposés.

3. EN 2008, PLUS DE 90 POUR CENT des Américains avaient des quantités détectables de bisphénol A dans leurs urines. Les enfants âgés de 6 à 11 ans présentaient les concentrations les plus élevées.



méta-analyse de plus de 100 études a montré que les hommes américains et européens auraient moitié moins de spermatozoïdes qu'il y a 50 ans. Au Danemark, des chercheurs estiment que dix pour cent des hommes ont un nombre de spermatozoïdes insuffisant pour être féconds. Et les cancers du testicule seraient en augmentation.

Moins de spermatozoïdes et des règles précoces

Selon certaines études, la fécondité des femmes serait aussi en baisse, même chez les jeunes femmes, bien que cela soit difficile à quantifier. Les raisons en sont multiples et complexes, mais la rapidité de ces changements suggère l'existence d'une composante environnementale. Le bisphénol A est-il impliqué? Il a plusieurs modes d'action, mais c'est surtout une molécule qui imite les estrogènes, les hormones féminines (les hommes ont aussi des estrogènes, mais en quantité moindre). Les effets d'une molécule reproduisant les effets des estrogènes sur le fœtus en développement sont ténus et ne sont pas visibles à la naissance. Ils se révèlent des années plus tard.

Chez l'homme, le meilleur exemple de ce phénomène est le cas tragique du distilbène, une substance contenant du diéthylstilbestrol (DES), un estrogène de synthèse prescrit à plus de dix millions de femmes entre 1938 et 1971. On pensait, à tort, que cette molécule réduisait le risque de fausses couches. De nombreux enfants, garçons et filles, dont les mères avaient pris cet estrogène pendant leur grossesse, ont présenté des anomalies du système reproducteur à l'âge adulte. Le distilbène a été utilisé durant des décen-

nies avant que l'on ne détecte ses effets délétères. Quelques médecins notèrent que les « filles distilbène » présentaient plus souvent que la moyenne une forme rare de cancer du vagin. Par la suite, des malformations de l'utérus, un risque accru de cancer du testicule, une infertilité et divers problèmes de reproduction ont été imputés à l'exposition des fœtus au distilbène.

Mais le distilbène n'est pas le bisphénol A. Ce dernier est beaucoup moins « puissant ». L'affinité du bisphénol A pour les deux principaux récepteurs des estrogènes est environ 10 000 fois plus faible que celle de l'estradiol, un estrogène naturel, ou que celle du distilbène. En outre, l'exposition de l'homme au bisphénol A est faible : les estimations publiées sont variables, mais elles donnent une fourchette de 1 à 15 microgrammes par kilogramme de poids corporel par jour, les nourrissons et les enfants étant les plus exposés.

L'Agence américaine de protection de l'environnement a fixé une « dose de référence » de 50 microgrammes par kilogramme de poids corporel. Cette concentration serait sans danger pour l'homme, même avec une exposition quotidienne durant toute la vie. La faible puissance estrogénique du bisphénol A, associée à une exposition limitée, suggère que ce perturbateur endocrinien aurait peu ou pas d'effets sur la santé.

Pourtant, différents laboratoires, dont le nôtre, accumulent les résultats montrant que le bisphénol A peut modifier la physiologie de la reproduction des rongeurs à des concentrations équivalentes ou inférieures à la dose de référence. Par exemple, chez les rongeurs exposés à de faibles quantités de bisphénol A, le cycle ovulatoire s'interrompt prématurément, ce qui réduit la fertilité. Nous avons découvert que des rats femelles exposées à 50 microgrammes de bisphénol A par kilogramme pendant les quatre premiers jours de vie commencent à avoir un cycle ovulatoire irrégulier dès l'âge de deux mois et demi. Alors que les rattes sont normalement fécondes pendant plus d'un an.

Un autre effet établi chez les rongeurs femelles est la modification de l'âge de la puberté. Cet effet dépend de la dose reçue : des concentrations en bisphénol A proches de la dose de référence avancent la puberté, alors que des concentrations supérieures la retardent (voir la figure 4). Cette perturbation de la puberté est intéressante pour deux raisons.

Tout d'abord, elle serait due à des concentrations en bisphénol A faibles plutôt qu'élevées (mais on ignore pourquoi). Ensuite, on constate chez l'homme que la puberté des filles a lieu plus tôt aujourd'hui, notamment dans les pays industrialisés. Les filles dont la puberté est avancée sont dix fois plus nombreuses que les garçons : presque la moitié des filles afro-américaines et environ 15 pour cent des filles caucasiennes présentent des signes de puberté, en particulier les premières règles et un développement des seins, dès l'âge de neuf ans. L'apparition de la puberté chez l'être humain dépend de plusieurs facteurs, tels l'état nutritionnel, le stress, les conditions socio-économiques et la génétique. Mais on pense que l'exposition à des composés semblables aux estrogènes, tel le bisphénol A, pourrait en partie expliquer ce phénomène.

Un développement cérébral modifié

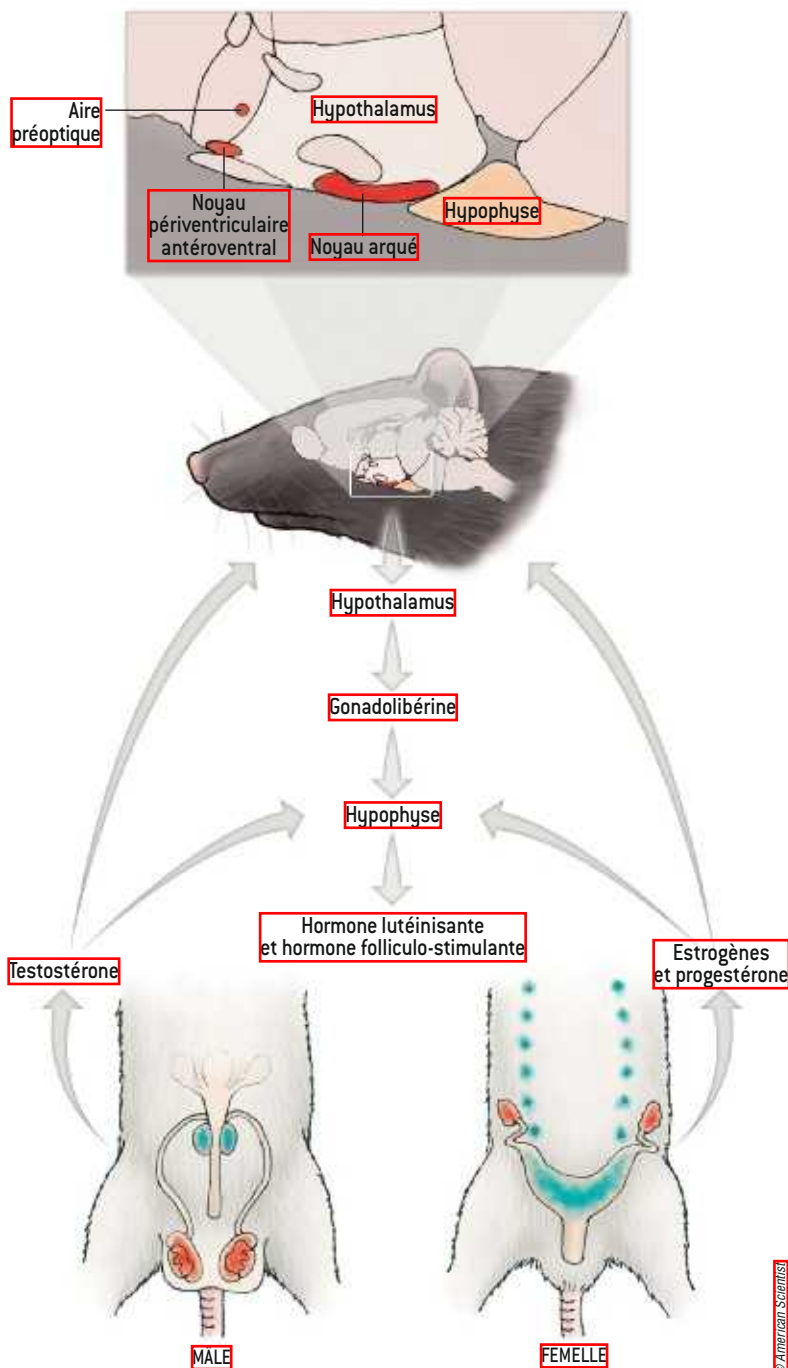
Comment les perturbateurs endocriniens modifient-ils l'âge de la puberté et la capacité de garder un cycle ovulatoire régulier ? Tout se jouerait pendant le développement du cerveau et de l'appareil reproducteur. La reproduction dépend de l'organisation et du fonctionnement correct de l'axe hypothalamo-hypophyso-gonadique, un système neuroendocrinien impliquant l'hypothalamus (une structure centrale du cerveau), l'hypophyse (une glande située au-dessous du cerveau qui libère les hormones dans le sang) et les gonades (les ovaires chez la femme, les testicules chez l'homme).

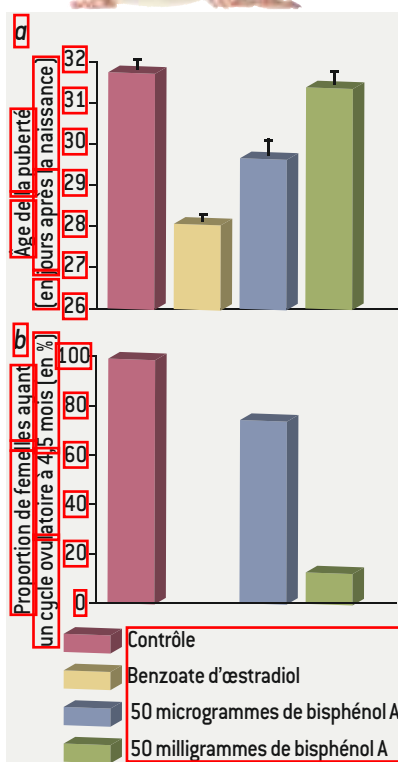
Les hormones participent à la mise en place de ces trois composants ; en conséquence, une exposition, au cours de la grossesse, à des perturbateurs endocriniens aurait des effets le long de cet axe. Dans l'hypothalamus, au centre du cerveau, se trouvent des noyaux dont le volume diffère avec le sexe ; on les dit sexuellement dimorphiques et on les utilise comme biomarqueurs pour étudier les conséquences neurodéveloppementales des perturbateurs endocriniens. Dans le cerveau des rongeurs, l'une des régions les plus étudiées est l'aire préoptique, un noyau sexuellement dimorphique ; celui-ci est plus gros chez les mâles que chez les femelles.

L'aire préoptique est sensible aux hormones stéroïdiennes – dont font partie les estrogènes – du 18^e jour de gestation

LE SYSTÈME DE REPRODUCTION DU RAT

La reproduction des mammifères est contrôlée par l'axe hypothalamo-hypophyso-gonadique, un système neuroendocrinien impliquant l'hypothalamus (une structure centrale du cerveau), l'hypophyse (une glande située à la base du cerveau derrière le front et qui libère des hormones dans la circulation sanguine) et les gonades (ovaires et testicules). Les hormones sexuelles (la testostérone, les estrogènes et la progestérone) influent sur le fonctionnement de l'axe. L'axe hypothalamo-hypophyso-gonadique du rat et celui de l'homme sont similaires, mais certaines aires cérébrales diffèrent. Chez le rat, les estrogènes masculinisent le cerveau. Chez l'homme, il semble que ce soient les androgènes. Le bisphénol A, qui imite les estrogènes, interfère avec le développement de l'axe des rongeurs et perturbe leur système reproducteur : des modifications ont été observées dans certaines aires (en rouge et en vert) chez des rats après une exposition au bisphénol A.





© Shutterstock/Elena Butinova

Une autre région cérébrale sexuellement dimorphique est le noyau périventriculaire antéroventral. Ce noyau est plus gros chez les rats femelles que chez les

Noyaux mâles, noyaux femelles

Les autres neurones intéressants du noyau périventriculaire antéroventral sont les neurones à kisspeptines, découverts récemment. On sait que le gène *kiss1*, qui

code une famille de protéines nommées kisspeptines, régule la sécrétion de gonadolibérine chez de nombreuses espèces, y compris l'homme. Il interviendrait dans l'apparition de la puberté et l'ovulation. Les personnes portant une forme mutée du récepteur des kisspeptines n'atteignent jamais leur maturité sexuelle.

Chez le rat, les neurones à kisspeptines sont présents dans le noyau périventriculaire antérovéntral et le noyau arqué, un autre noyau de l'hypothalamus. La densité de ces neurones ne varie entre mâles et femelles que dans le noyau périventriculaire antérovéntral, les femelles en ayant plus que les mâles. On pense que ces neurones jouent un rôle essentiel dans le

déclenchement du pic de gonadolibérine qui précède l'ovulation.

Pour déterminer si le bisphénol A perturbe le développement du système à kisspeptines, nous avons injecté à des rats 50 milligrammes ou 50 microgrammes de bisphénol A par kilogramme, chaque jour pendant quatre jours après la naissance. Le système à kisspeptines est sensible aux estrogènes pendant cette période (chez l'homme, cette période sensible correspond au début du deuxième trimestre de la grossesse).

Pour les rats femelles, seule la concentration élevée de bisphénol A modifie le nombre de neurones à kisspeptines dans le noyau périventriculaire antérovéntral. Nous n'avons observé aucun effet chez

L'AUTEUR



Heather PATISAUL est professeur de biologie à l'Université d'État de Caroline du Nord, aux États-Unis, et spécialiste en neuroendocrinologie.

L'histoire du bisphénol A

Le bisphénol A est un des composants essentiels des plastiques. Une brève histoire de ce composé a été retracée.

1891 : Le chimiste Alexandre Dianin, à Saint-Petersbourg en Russie, synthétise le bisphénol A.

1957 : Le bisphénol A est produit commercialement et incorporé dans les résines époxy.

1988 : L'Agence américaine de protection de l'environnement fixe la dose maximale, ou dose de référence, à 50 microgrammes de bisphénol A par kilogramme de poids corporel.

1996 : L'Administration américaine pour l'alimentation et les médicaments, FDA, indique que les adultes sont exposés à environ 11 microgrammes de bisphénol A par jour et les enfants à 7 microgrammes.

1997 : Fred vom Saal, de l'Université du Missouri-Colombia aux États-Unis, publie la première étude sur l'animal montrant des effets nocifs sur l'appareil reproducteur. La FDA découvre du bisphénol A dans du lait en poudre pour nourrissons : le composé est présent dans les aliments.

1999 : L'Union des consommateurs américains montre que le bisphénol A passe dans le lait quand les biberons sont chauffés.

La FDA affirme que le bisphénol A est sans danger, car les doses chez l'homme sont très faibles.

2006 : Un rapport préliminaire d'une commission américaine conclut que le bisphénol A est sans danger, mais de nombreux scientifiques contestent cette conclusion, notant que certaines études sur l'animal n'ont pas été prises en compte.

2007 : Le rapport final de cette commission admet une « certaine inquiétude » concernant les effets sur le système nerveux et le comportement d'une exposition du fœtus au bisphénol A. Le Congrès demande à la FDA de clarifier sa position sur le bisphénol A.

2008 : Le Canada interdit le bisphénol A dans les biberons et les go-belets pour enfants. Des projets de lois dans dix États aux États-Unis visent à limiter ou interdire le bisphénol A. Plusieurs fabricants envisagent de mettre fin à l'utilisation du bisphénol A. La FDA réaffirme sa position selon laquelle le bisphénol A est sans danger.

2009 : Un fabricant de bisphénol A annonce qu'il cesse de commercialiser ce produit chimique pour son utilisation dans des récipients d'aliments pour enfants. Le Minnesota est le premier État à interdire le bisphénol A dans les biberons. La So-

ciété d'endocrinologie américaine réclame des examens plus approfondis et un contrôle centralisé des perturbateurs endocriniens suspects. L'administration Obama demande au Congrès de préparer une législation permettant un examen et un contrôle plus rigoureux des produits chimiques, dont le bisphénol A.

En France, l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (AFSSA) se saisit du dossier en octobre pour une nouvelle expertise. Dans ses conclusions, l'AFSSA ne dit pas que le bisphénol A est dangereux, ni qu'il doit être interdit. Elle

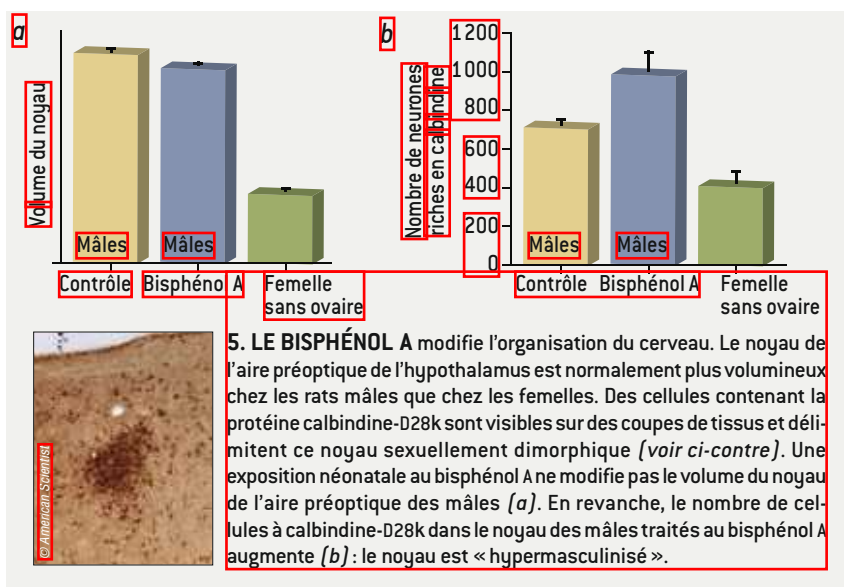
demande de nouvelles études et alerte les consommateurs sur des précautions d'usage. « Des effets subtils, observés en particulier sur le comportement après une exposition *in utero* et pendant les premiers mois de vie chez de jeunes rats, amènent l'Agence à poursuivre son travail d'expertise, en lien avec l'EFSA (*European food safety authority*) et le réseau international des agences, pour comprendre la signification en termes de santé humaine de ces signaux d'alerte, éclairer le consommateur et permettre aux pouvoirs publics de prendre des mesures appropriées. »

2010 : Aux États-Unis, la FDA émet en janvier des recommandations pour les nourrissons (préférer l'allaitement maternel et recours exclusif à des biberons sans bisphénol A).

L'EFSA décide de réunir à nouveau des experts nationaux des États de l'Union européenne. La loi française demandant l'interdiction du bisphénol A dans tous les biberons a été votée à l'unanimité par le Sénat le 24 mars, puis à la majorité par l'Assemblée nationale le 23 juin. La secrétaire d'État au développement durable, Valérie Létard, a pris date pour statuer en janvier 2011 sur l'évolution de la réglementation sur le bisphénol A. Plusieurs municipalités françaises, dont Paris, ont déjà interdit les biberons au bisphénol A dans les crèches.



Même si la communauté scientifique n'a pas encore apporté de conclusion définitive quant aux risques du bisphénol A, les consommateurs optent de plus en plus pour les biberons et les plastiques pour aliments portant la mention « sans bisphénol A ».



Nous remercions la revue *American Scientist* de nous avoir autorisés à reproduire cet article.

BIBLIOGRAPHIE

L. Vandenberg *et al.*, Bisphenol-A and the great divide : a review of controversies in the field of endocrine disruption, *Endocrine Reviews*, vol. 30, pp. 75-95, 2009.

H. Patisaul *et al.*, Impact of neonatal exposure to the ERalpha agonist PPT, bisphenol-A or phytoestrogens on hypothalamic kisspeptin fiber density in male and female rats, *Neurotoxicology*, vol. 30, pp. 350-357, 2009.

M. Durando *et al.*, Prenatal bisphenol A exposure induces preneoplastic lesions in the mammary gland in Wistar rats, *Environmental Health Perspectives*, vol. 115, pp. 80-86, 2007.

A. Calafat *et al.*, Urinary concentrations of bisphenol A and 4-nonylphenol in a human reference population, *Environmental Health Perspectives*, vol. 113, pp. 391-395, 2005.

les mâles. Toutefois, nous avons découvert une faible diminution des neurones à kisspeptines dans le noyau arqué des femelles. Ces découvertes montrent que des effets permanents, spécifiques du sexe, se manifestent dans le cerveau pour des niveaux d'exposition au bisphénol A proches de la dose de référence.

Réagir aux critiques

Nos travaux ont été critiqués pour plusieurs raisons. Les animaux n'ont pas ingéré le bisphénol A, mais nous leur avons injecté. Les hommes sont surtout contaminés par voie orale, donc on peut craindre que l'injection ne soit pas une voie d'exposition appropriée. L'injection d'un produit court-circuite le processus qui dégrade la plus grande partie du bisphénol A, le rendant inactif. Les industriels du plastique soutiennent que le bisphénol A est rapidement métabolisé et excrété chez l'homme, et ne présente pas de danger. Au contraire, l'injection entraînerait des concentrations sanguines de bisphénol A actif plus élevées.

Toutefois, une étude comparant les effets de l'administration par voie orale et de l'injection chez des rongeurs de bisphénol A, pendant la période néonatale, n'a pas révélé de différences dans les concentrations sanguines du produit ou de ses métabolites. De surcroît, les rongeurs et les hommes ne métabolisent pas le bisphénol A de la même façon. Chez l'homme, la plupart des métabolites se retrouvent dans les urines, mais dans les excréments chez le rat. Et même si la plus grande partie du

bisphénol A est inactivée chez les hommes adultes, ce n'est sans doute pas le cas chez les enfants et les nourrissons, car leur système gastro-intestinal n'est pas mature. Le débat scientifique persiste en ce qui concerne la capacité des rongeurs et des enfants à métaboliser le bisphénol A.

Qui plus est, il existe des différences anatomiques entre le cerveau d'un rongeur et celui d'un homme. Notamment, chez les hommes et les autres primates, les androgènes, plutôt que les estrogènes chez les rongeurs, seraient responsables de la masculinisation de l'hypothalamus. Dès lors, une perturbation de l'organisation du noyau périventriculaire antéroventral chez le rat ne prédirait pas un effet similaire chez l'homme. Cependant, une modification de ce noyau indique bien que le bisphénol A interagit avec les voies estrogéniques du développement, un phénomène qui peut avoir des conséquences dans la formation du cerveau humain.

Enfin, si les hommes n'ont pas de noyau périventriculaire antéroventral, ils ont des neurones à kisspeptines et des aires cérébrales particulières coordonnent la libération de gonadolibérine. Nous pensons donc que l'étude de cette population de neurones peut nous apporter des informations sur les effets du bisphénol A chez l'homme. Ces critiques soulignent qu'il est difficile de transposer à l'homme les résultats obtenus avec les rongeurs, mais elles ne remettent pas en cause les recherches sur l'animal.

Nous l'avons évoqué, l'exposition au bisphénol A entraîne des anomalies des cycles ovulatoires et de l'appareil reproducteur chez les rongeurs. Certaines équipes ont même montré que le bisphénol A engendre la mort de certaines cellules des ovaires chez le rongeur adulte. Et l'ovaire ne serait pas la seule cible du bisphénol A : différents laboratoires ont constaté qu'une exposition au bisphénol A pendant la gestation à des concentrations inférieures à la dose de référence peut entraîner des anomalies de l'utérus et de la prostate, modifier le développement des glandes mammaires et diminuer la capacité de mener une gestation à son terme.

Mais il nous faut admettre que plusieurs études n'ont pas trouvé le moindre effet du bisphénol A ! La plus récente date d'octobre 2009 et a été publiée par l'Agence américaine de protection de l'environnement ; elle n'a trouvé aucun changement dans la date d'apparition de la maturité

sexuelle, le comportement sexuel ou la fécondité chez des rats femelles après une exposition au bisphénol A pendant la gestation et la lactation. Ces résultats contradictoires rendent l'évaluation du risque encore plus difficile chez l'homme. On ignore pourquoi toutes les équipes ne retrouvent pas les mêmes effets.

Savoir comment interpréter les résultats obtenus en laboratoire est pourtant capital, car le bisphénol A n'est pas le seul perturbateur endocrinien auquel est exposée la population. Des milliers d'autres substances auraient des propriétés similaires, par exemple des produits limitant la propagation des flammes, des pesticides et des antimicrobiens. Et il est important de considérer l'effet combiné d'une exposition à de multiples perturbateurs endocriniens. Récemment, une équipe de recherche de l'Université d'État de Washington n'a pas pu reproduire les effets du bisphénol A sur les ovaires de souris. En fait, ces effets n'étaient observés que chez des souris soumises à un régime riche en soja, un aliment naturellement riche en génistéine qui est aussi un perturbateur endocrinien. Le régime

alimentaire, parmi d'autres différences méthodologiques, pourrait expliquer pourquoi les résultats obtenus sur l'effet des faibles doses de bisphénol A sont contradictoires.

Mettre en œuvre le principe de précaution ?

Qui plus est, les perturbateurs endocriniens auraient des effets d'une génération à l'autre. Par exemple, on commence à craindre que les filles des « filles distilbène » (désignées sous le nom de « petites-filles distilbène ») puissent aussi être confrontées à des troubles de la reproduction. Pour elles, l'exposition s'est produite alors qu'elles n'étaient que des cellules germinales dans les ovaires en développement de leurs mères, dans l'utérus de leurs grands-mères.

Comment les effets d'une perturbation endocrinienne se transmettent-ils aux générations suivantes ? Des mécanismes épigénétiques seraient en cause. L'hérédité épigénétique implique des changements

dans les schémas d'expression des gènes sans modification de la séquence des gènes. Si des modifications épigénétiques ont lieu dans les cellules germinales, la transmission aux générations suivantes est possible. Randy Jirtle, de l'Université Duke aux États-Unis, a montré que le bisphénol A engendre des modifications épigénétiques chez la souris. D'autres molécules, tels les biphenyles polychlorés (ou PCB) et la vinclozoline, un fongicide, ont des effets transgénérationnels, sans doute par des mécanismes épigénétiques.

Étant donné ce contexte complexe, une stratégie scientifique claire pour identifier, étudier et contrôler les composés suspectés d'être des perturbateurs endocriniens est nécessaire. Presque 40 ans après l'interdiction du DDT, un pesticide mais aussi le premier perturbateur endocrinien reconnu, les nouveaux produits chimiques ne sont pas toujours testés pour leurs propriétés endocriniennes. Aujourd'hui, les effets du bisphénol A continuent à faire débat, mais il y a suffisamment de preuves chez l'animal pour justifier des mesures de précaution.

Et tout s'éclaire

france culture

La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec Aurélie Luneau
en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com

CRÉAM ON - photo France / Christophe Jamin

Des **super-Terres** accueillantes

Dimitar Sasselov et Diana Valencia

Il existe sans nul doute d'innombrables planètes extrasolaires. Mais à quoi ressemblent-elles ? Les modèles suggèrent qu'un grand nombre d'entre elles seraient semblables à la Terre, et susceptibles d'abriter la vie.

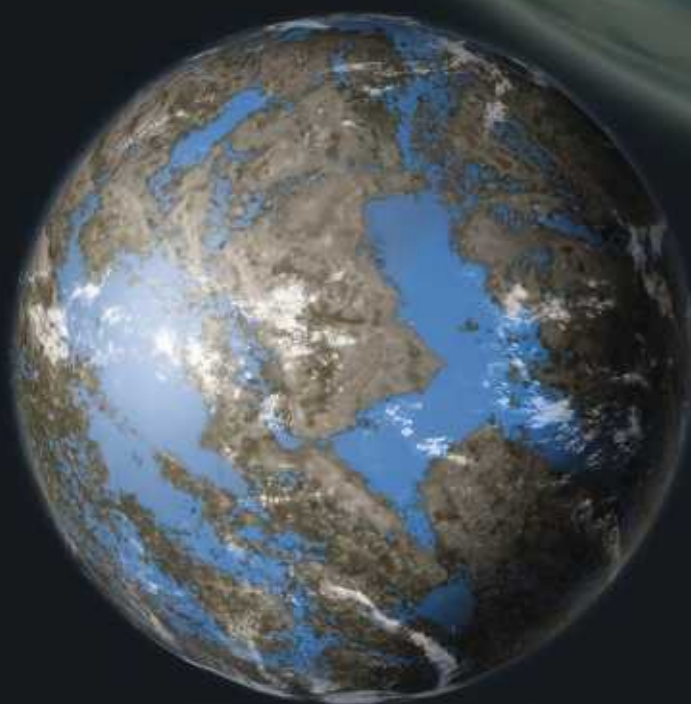
L'ESSENTIEL

✓ Le rythme de détection des planètes extrasolaires s'accélère ; on commence à découvrir des planètes de quelques masses terrestres.

✓ Selon les modèles, les planètes rocheuses plus grosses que la Terre pourraient être géologiquement actives et avoir une atmosphère et un climat stables.

✓ Les conditions sur certaines de ces « super-Terres » pourraient être favorables à la vie.

LES PLANÈTES EXTRASOLAIRES déjà découvertes (490 à la fin août 2010) sont pour la plupart des géantes gazeuses semblables à Jupiter (*en haut et en bas sur cette vue d'artiste*). Mais on commence à détecter des planètes plus petites qui pourraient ressembler à des versions agrandies de la Terre. D'autres seraient couvertes d'eau (*au centre*).





Vous êtes en train de contempler le ciel nocturne. Vous regardez en direction d'une étoile autour de laquelle tourne, avez-vous lu, une planète au statut particulier. Même si vous ne pouvez pas la voir – vous apercevez à peine l'étoile elle-même –, vous savez qu'elle est plusieurs fois plus grosse que la Terre et pour l'essentiel constituée de roches. Des séismes en agitent parfois la surface, qui est en grande partie recouverte d'océans. Son atmosphère n'est pas si différente de celle que nous respirons, et son ciel est balayé de fréquentes tempêtes et souvent obscurci par des cendres volcaniques. Abrite-t-elle la vie ? Selon les scientifiques, ce n'est pas impossible...

Cette rêverie astronomique pourrait bientôt devenir réalité. Bien que la plupart des quelque 500 planètes extrasolaires découvertes jusqu'à présent soient des géantes gazeuses ressemblant plutôt à Jupiter, les astronomes commencent à en découvrir certaines – notamment grâce au télescope spatial européen CoRoT – qui pourraient ne pas être très différentes de la Terre. Et l'Observatoire spatial américain *Kepler*, lancé l'année dernière, en découvrira sans doute bien davantage.

Bien sûr, ces exoplanètes se trouvent à des années-lumière, si bien que même nos télescopes les plus perfectionnés ne sont pas en mesure de discerner les détails de leur surface (montagnes, nuages, mers, etc.). Peut-être ne le pourront-ils jamais. En général, nous pouvons seulement mettre en évidence de façon indirecte la présence d'une planète, et estimer sa masse et la taille de son orbite. Dans certains cas, les instruments ont réussi à obtenir des informations sur le diamètre de la planète et quelques autres détails. On connaît ainsi grossièrement la composition atmosphérique et la dynamique des vents de certaines exoplanètes géantes gazeuses.

Nous sommes donc loin de mesurer des données précises concernant la géologie, la chimie ou d'autres caractéristiques des exoplanètes. Et pourtant, à partir de quelques éléments, les chercheurs sont capables de dresser des portraits complexes de ces planètes lointaines, à l'aide de modèles théoriques, de simulations numériques et même d'expériences de laboratoire, combinés aux connaissances établies pour la Terre et les autres planètes du Système solaire.

Dans nos recherches, par exemple, nous avons modélisé des planètes de

Cor Milla

composition similaire à celle de la Terre. Nous avons découvert que de telles planètes, même quand elles sont bien plus massives que la nôtre, semblent géologiquement actives et posséder une atmosphère et un climat qui pourraient être favorables à la vie. En fait, la Terre se situe peut-être à la limite inférieure de la plage de masses possibles pour qu'une planète soit habitable. En d'autres termes, si la Terre avait été un peu plus petite, elle serait devenue aussi stérile que Mars ou Vénus.

Les premières super-Terres

La première planète extrasolaire a été découverte au milieu des années 1990 par la méthode des « vitesses radiales », qui consiste à détecter la présence d'une planète par ses effets gravitationnels sur son étoile. La gravité de la planète imprime un léger mouvement oscillant à l'étoile ; mouvement qui est détecté sous forme d'un décalage du spectre lumineux de l'astre.

Dans les premiers temps, certains chercheurs se sont demandé si ces oscillations résultaient de la physique de l'étoile ou de la présence de planètes en orbite. Il y a une dizaine d'années, l'un

d'entre nous, D. Sasselov, alors spécialiste des étoiles variables, a contribué à montrer que les oscillations étaient bien causées par des planètes, validant ainsi la méthode des vitesses radiales.

D. Sasselov a ensuite rejoint le projet de l'Observatoire spatial *Kepler*, destiné à la recherche des exoplanètes. *Kepler* a finalement été mis en orbite en 2009. Comme CoRoT, il est conçu pour détecter des planètes par la méthode des transits, c'est-à-dire en observant les petites baisses de luminosité périodiques d'une étoile lorsqu'une planète en orbite passe devant elle. Le télescope de *Kepler* pointe sur une petite région du ciel près de la constellation du Cygne. Sa caméra à grand-angle suivra environ 150 000 étoiles en continu durant trois ans. *Kepler* devrait permettre de trouver des centaines de nouvelles planètes, dont certaines aussi petites que la Terre.

Dès les premiers stades de planification de la mission, D. Sasselov a réalisé que les scientifiques ne sauraient pas nécessairement exploiter la masse de données produites par *Kepler*. Par exemple, personne n'avait alors modélisé les processus géologiques à l'œuvre dans une grosse planète tellurique. Face à ce constat, D. Sasselov commença à travailler avec Richard

✓ SUR LE WEB

Site du télescope spatial Kepler : <http://kepler.nasa.gov/>

Le site de la mission CoRoT : <http://sci.esa.int/corot/>



Commentez cet article sur : www.pourlascience.fr

DESTINATIONS DE CHOIX DANS LA VOIE LACTÉE

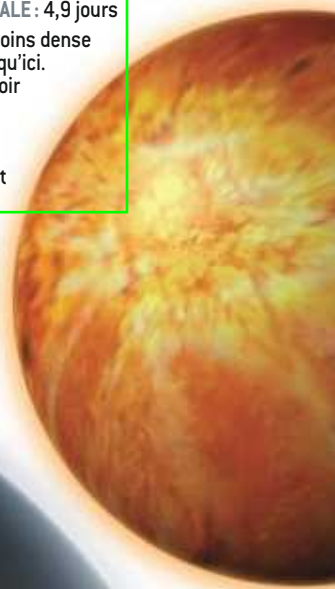
Parce que les grosses planètes sont plus faciles à détecter que les petites, la plupart des 490 planètes connues à ce jour sont massives, jusqu'à huit fois plus que Jupiter. Pour la plupart, on ne peut estimer que leur masse et leur orbite, mais pas leur rayon. Pour certaines, cependant, le rayon est connu. C'est notamment le cas de deux planètes relativement petites, les super-Terres CoRoT-7b et GJ1214b.

PLANÈTE : Terre
TYPE : Tellurique (rocheux)
MASSE : 1 masse terrestre
RAYON : 1 rayon terrestre (6 371 kilomètres)
PÉRIODE ORBITALE : 365 jours
 La géologie active, couplée à la « bonne » distance de la planète à son étoile mère, contribue à maintenir des températures de surface propices à la persistance de l'eau liquide. Très hospitalière pour la vie.

PLANÈTE : GJ1214b
TYPE : Super-Terre
DATE DE DÉCOUVERTE : 2009
MASSE : 6,55 masses terrestres
RAYON : 2,7 rayons terrestres
PÉRIODE ORBITALE : 38 heures
 Une des deux seules super-Terres dont on connaît le rayon. Elle s'apparente davantage à une mini-Neptune, avec un intérieur de glace et de roche, et une enveloppe gazeuse.

PLANÈTE : CoRoT-7b
TYPE : Super-Terre rocheuse
DATE DE DÉCOUVERTE : 2009
MASSE : 4,8 masses terrestres
RAYON : 1,7 rayon terrestre
PÉRIODE ORBITALE : 20 heures
 La première super-Terre dont on a mesuré le rayon. Elle présente toujours la même face à son étoile ; celle-ci est si chaude qu'elle est fondue en permanence. Des nuages de silice s'élèvent et se condensent sur le côté nuit constamment glacial.

PLANÈTE : Kepler 7b
TYPE : Géante gazeuse
DATE DE DÉCOUVERTE : 2009
MASSE : 0,43 masse de Jupiter
RAYON : 1,48 rayon de Jupiter
PÉRIODE ORBITALE : 4,9 jours
 La planète la moins dense découverte jusqu'ici. Elle pourrait avoir un petit noyau rocheux, mais elle est essentiellement gazeuse.



O'Connell, spécialiste de la structure de la Terre à l'Université Harvard.

Suite à une conversation avec D. Sas-selov, R. O'Connell demanda à ses étudiants de réfléchir à la façon dont la taille de la Terre serait modifiée si sa masse était supérieure. Dans quelle mesure le supplément de gravité contracterait-il la planète ? La question passionna Diana Valencia (l'autre auteur de cet article), une de ses étudiantes, qui s'engagea dans le champ de la dynamique des exoplanètes.

Dans le Système solaire, la Terre est la plus grosse des planètes rocheuses (ou telluriques), de sorte que l'on n'avait pas envisagé de planètes rocheuses plus massives, qualifiées aujourd'hui de super-Terres. Lorsque nous avons soumis en 2004 notre premier article sur le sujet, de nombreux planétologues restaient perplexes : les seules exoplanètes découvertes jusqu'alors étaient des géantes de la classe de Jupiter. Pourquoi étudier des planètes telluriques massives, dont l'existence était incertaine ?

Le bien-fondé de notre entreprise a néanmoins été vite confirmé. Par la méthode des vitesses radiales, Eugenio Rivera, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et ses collaborateurs ont découvert en 2005 une planète en orbite autour de l'étoile Gliese 876, dans la constellation du Verseau, qui avait les caractéristiques d'une super-Terre.

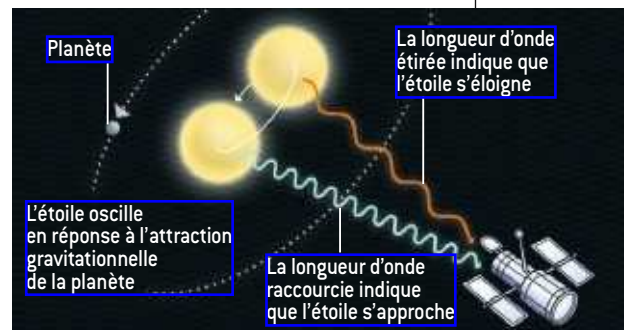
Nommée GJ 876d, cette planète fait le tour de son étoile en deux jours seulement, et sa masse vaut approximativement 7,5 fois celle de la Terre. C'est cependant

COMMENT REPÉRER UNE PLANÈTE

Comparées aux étoiles autour desquelles elles tournent, les planètes sont des sources lumineuses de très faible intensité. Par conséquent, seule une poignée de planètes extrasolaires, toutes grosses et brillantes, ont été « vues » directement, c'est-à-dire comme un point lumineux distinct de leur étoile. Dans certains cas, les astronomes ont distingué le spectre de la lumière réfléchiée par la planète mélangé à celui de l'étoile. La plupart des autres planètes n'ont été détectées que de façon indirecte, en général par la méthode des vitesses radiales ou celle des transits.

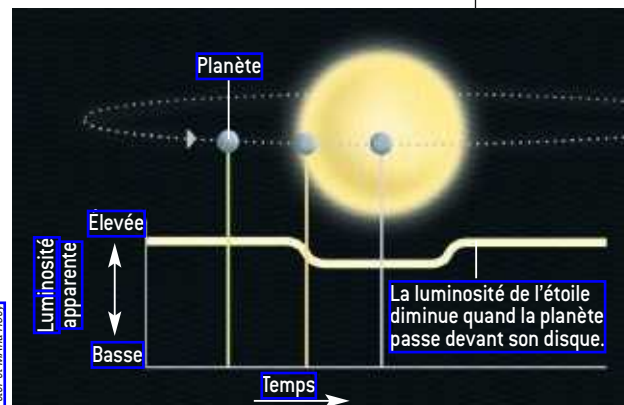
MÉTHODE DES VITESSES RADIALES

Tout au long de son orbite, une planète attire légèrement vers elle son étoile. Les infimes changements de la vitesse relative de l'étoile par rapport à la Terre qui en résultent se traduisent par des décalages tenus dans le spectre lumineux de l'étoile. On sait détecter des variations d'à peine un mètre par seconde. Leur périodicité révèle la présence de la planète.



MÉTHODE DES TRANSITS

Si l'orbite d'une planète croise la ligne de visée de son étoile à la Terre, elle bloque partiellement la lumière de l'étoile, comme une éclipse de Lune obscurcit le Soleil. Le transit d'une planète de la taille de Jupiter fait baisser la luminosité de son étoile d'environ un pour cent (cela dépend aussi de sa distance à l'étoile) ; pour une planète de la taille de la Terre, la baisse est d'environ 0,01 pour cent. Une variation aujourd'hui décelable.



PLANÈTE : HD149026b

TYPE : Géante gazeuse

DATE DE DÉCOUVERTE : 2005

MASSE : 0,36 masse de Jupiter

RAYON : 0,65 rayon de Jupiter

PÉRIODE ORBITALE : 69 heures

La planète géante la plus dense découverte à ce jour. Son orbite est si proche de son étoile que sa température en surface dépasserait 2 000 °C.

PLANÈTE : Osiris (HD209458b)

TYPE : Géante gazeuse

DATE DE DÉCOUVERTE : 1999

MASSE : 0,69 masse de Jupiter

RAYON : 1,32 rayon de Jupiter

PÉRIODE ORBITALE : 3,5 jours

Une des rares planètes dont la lumière a été isolée dans le spectre de son étoile. Son spectre révèle la présence d'oxygène et de carbone dans l'atmosphère. Il y aurait également de la vapeur d'eau.

PLANÈTE : Fomalhaut b

TYPE : Géante gazeuse

DATE DE DÉCOUVERTE : 2008

MASSE : 0,5 à 3 masses de Jupiter

RAYON : 1 rayon de Jupiter ?

PÉRIODE ORBITALE : 872 ans

Une des rares planètes extrasolaires, et l'objet de plus faible masse hors du Système solaire, à avoir été détectées de façon directe.

à peu près tout ce que nous pouvons en dire. En particulier, nous ne connaissons pas la densité moyenne de GJ 876d, et *a fortiori* pas sa composition, car la méthode des vitesses radiales ne permet pas de mesurer sa taille (ni son volume).

La méthode des transits livre ces données : l'intensité de la baisse de luminosité de l'étoile, donne, connaissant la distance de la planète, le diamètre de cette dernière. Si l'on mesure aussi les variations de vitesse radiale de l'étoile, on peut alors connaître à la fois la masse et le diamètre de la planète, et donc calculer sa densité moyenne. Une densité élevée est le signe probable d'une planète rocheuse.

C'est grâce à cette méthode que les astronomes de l'équipe de l'Observatoire CoRoT ont découvert début 2009 la première super-Terre en transit, CoRoT-7b. Avec une masse environ cinq fois supérieure et un rayon 1,6 fois plus grand que la Terre, cette planète a une densité 1,2 fois supérieure à la nôtre : elle est assurément formée de roche. Cependant, CoRoT-7b est très proche de son étoile (son année dure moins longtemps qu'un de nos jours) et lui présente toujours la même face – comme la Lune avec la Terre –, si bien que son côté jour doit être un océan de lave fondue.

À peine dix mois plus tard, le projet au sol *MEarth*, dirigé par David Charbonneau, du Centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique, a découvert une deuxième super-Terre en transit, GJ1214b. Cette planète de 5,5 à 7,5 masses terrestres est inhabituelle en cela qu'elle a une densité de 1,8, plus proche de celle de l'eau que de celle de la roche, ce qui suggère qu'elle doit avoir une épaisse enveloppe de gaz, voire être recouverte d'eau.

Aucune de ces deux planètes n'est semblable à la nôtre. Nous sommes à la recherche de planètes telluriques habitables, mais nous ne trouvons que des monstres. Et d'autres étrangetés vont vraisemblablement se présenter à nous. Par exemple, autour d'étoiles très riches en carbone, les éventuelles planètes rocheuses ne seraient pas constituées pour l'essentiel de composés de silicium et d'oxygène, comme dans le Système solaire, mais de composés de silicium et de carbone. Cela donnerait un type de planète très différent, avec un intérieur formé en grande partie de diamant, à cause de la pression.

Mais comme la plupart des systèmes stellaires ont des compositions semblables

à celle du Système solaire, les chercheurs s'attendent à ce que la composition des super-Terres soit assez proche de celle de la Terre – pour l'essentiel, du silicium lié à de l'oxygène et du magnésium, plus du fer, et d'autres éléments en plus petites quantités –, avec de grandes quantités d'eau. Bientôt, nous découvrirons sans doute beaucoup de planètes de ce type, c'est pourquoi il faut en apprendre davantage sur elles, à commencer par leur physique interne.

Voyage au centre d'une super-Terre

Il devrait exister deux catégories principales de super-Terres, selon la région de leur système planétaire où elles se forment. Celles qui sont nées suffisamment loin de leur étoile accumulent de grandes quantités de particules de glace du disque protoplanétaire, et l'eau doit constituer une part beaucoup plus importante de leur masse que pour les planètes telluriques du Système solaire. En revanche, les planètes qui se sont formées plus près de leur étoile, là où il fait trop chaud pour que de la glace soit présente, finissent relativement sèches, comme la Terre et ses compagnes rocheuses du Système solaire.

Une planète rocheuse commence sa vie comme un mélange brûlant de matériau fondu qui refroidit en rayonnant de la chaleur dans l'espace. Des cristaux à base de fer et de silicates se forment alors dans le magma, qui se solidifie. En fonction de la quantité d'oxygène, une partie plus ou moins grande du fer restée libre, très dense, sombre jusqu'au centre. Comme la Terre, la planète acquiert finalement une structure en oignon, avec un noyau ferreux et un manteau de silicates.

Selon la taille de cette planète rocheuse par rapport à celle de la Terre, une différence apparaît au niveau du noyau. Le noyau terrestre s'est suffisamment refroidi pendant des milliards d'années pour que sa partie interne se solidifie, tandis que sa couche externe reste liquide, et brassée par des courants convectifs. On pense que cette convection du noyau externe est à l'origine du champ magnétique de la Terre.

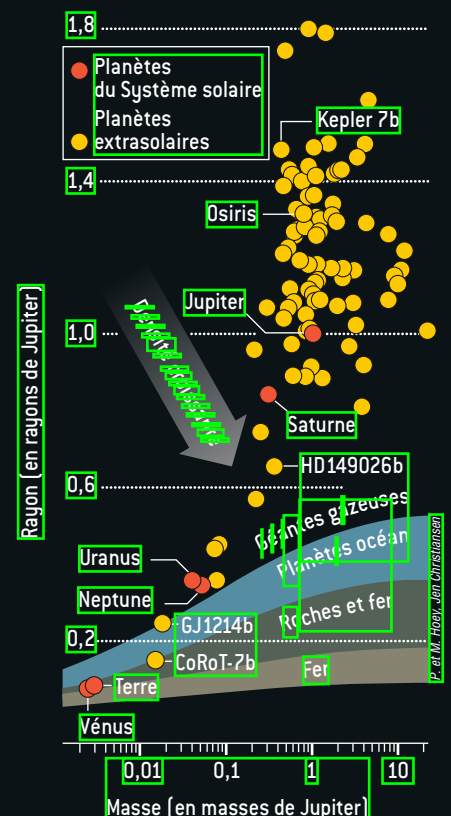
Mais d'après des calculs théoriques récents, les pressions qui règnent dans le noyau d'une grosse planète sont telles que le fer peut rester solide jusqu'à des températures de 10000 degrés. Or les planètes ne dépassent sans doute ces températures que dans leur prime jeunesse, et

UNE VIE MEILLEURE AVEC LA GÉOPHYSIQUE

L'activité géophysique pourrait être cruciale pour qu'une planète soit habitable. Les modèles théoriques et les simulations numériques, couplés aux connaissances acquises sur la Terre et les autres planètes du Système solaire, permettent aux astronomes de prédire la dynamique d'une planète à partir de sa masse et de sa composition. Les travaux sur les petites planètes se sont concentrés sur les super-Terres et les planètes océans, dont les éléments constitutifs sont répandus dans la Galaxie. Dans les deux cas, la convection brasse lentement les couches internes, transportant la chaleur interne de la planète jusqu'à la surface. Ce bouillonnement est le moteur du volcanisme et de la tectonique des plaques, qui contribuent à enrichir l'atmosphère en éléments chimiques nécessaires à la vie ; atmosphère qui contribue à son tour à stabiliser les températures de surface.

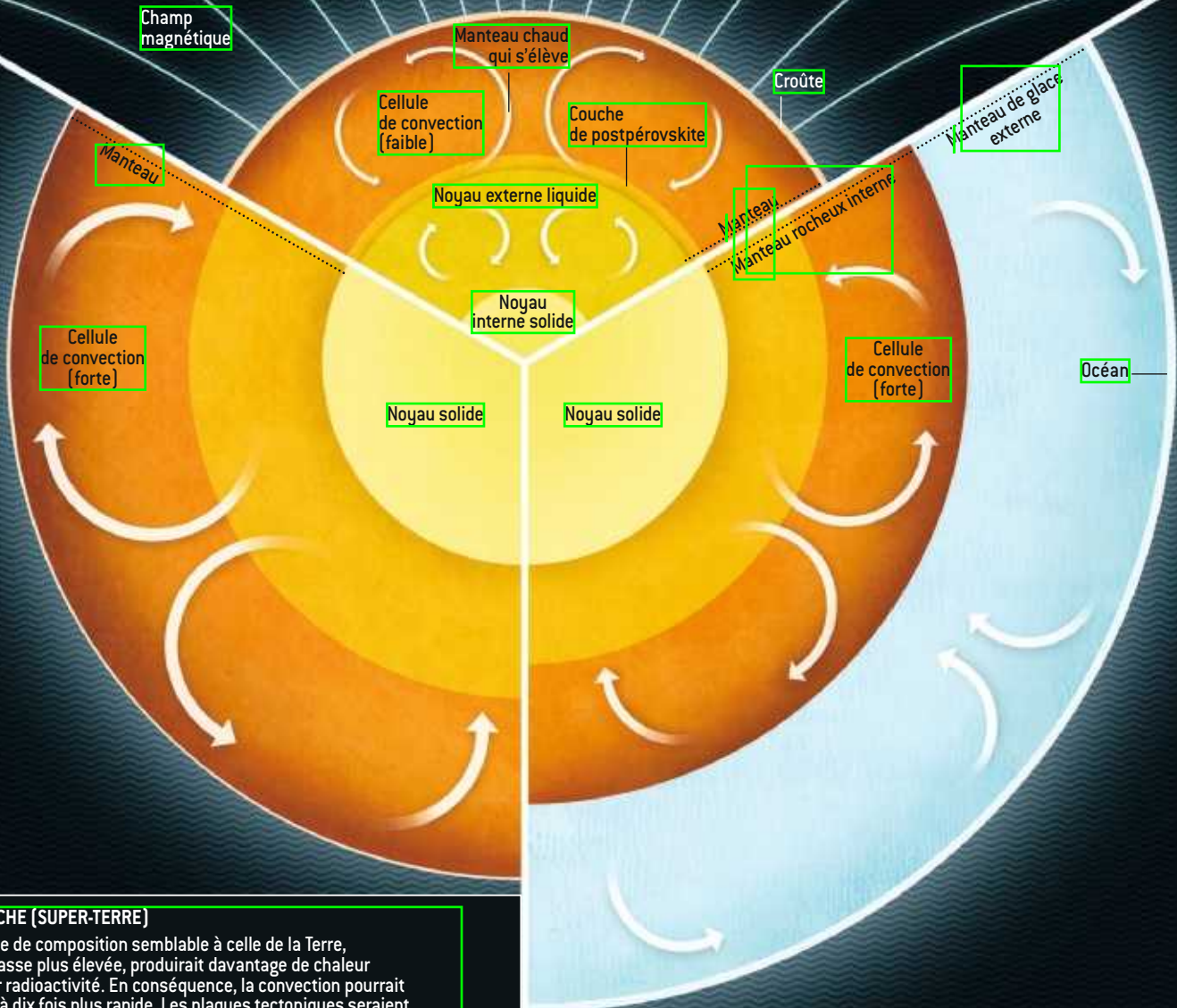
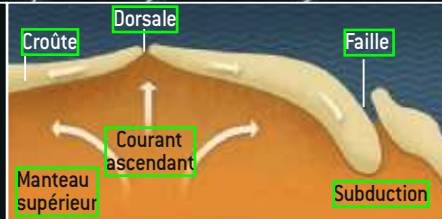
▼ TROIS TYPES DE PLANÈTES ROCHEUSES

Les astronomes ont détecté plus de 80 planètes par la méthode des transits, et réussi à estimer leur densité moyenne. Cela pose des contraintes fortes sur leur composition. Les planètes les moins denses sont vraisemblablement des géantes gazeuses ; les planètes un peu plus lourdes pourraient être rocheuses, avec des quantités variables de fer et d'eau ; les plus lourdes sont vraisemblablement constituées en majeure partie de fer.



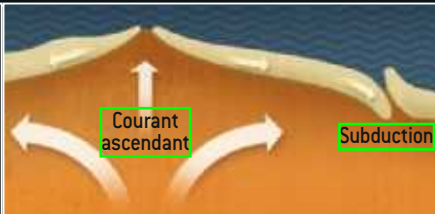
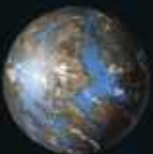
FER ET ROCHE (TERRE)

Sur Terre, la convection dans le manteau dominé par les silicates est le moteur du volcanisme et de la tectonique des plaques. La chaleur interne est en partie le résidu de la formation planétaire, et en partie produite par la radioactivité du manteau. On pense que c'est la convection dans le noyau externe de fer liquide qui engendre le champ magnétique terrestre, lequel contribue à protéger la vie des rayons cosmiques et du vent solaire.



FER ET ROCHE (SUPER-TERRE)

Une planète de composition semblable à celle de la Terre, mais de masse plus élevée, produirait davantage de chaleur interne par radioactivité. En conséquence, la convection pourrait être jusqu'à dix fois plus rapide. Les plaques tectoniques seraient plus minces, car elles auraient moins de temps pour s'épaissir lors de leur dérive. Le noyau de fer serait entièrement solide, et ne produirait donc pas de champ magnétique global. Ce pourrait être un problème pour la vie sur la terre ferme.



EAU, ROCHE ET FER (PLANÈTE OCÉAN)

Une planète constituée d'une grande quantité d'eau, en plus du fer et de la roche, aurait deux manteaux solides : l'un rocheux, et l'autre de glace d'eau, qui serait sous forme solide aux pressions qui règnent sous un océan de plusieurs centaines de kilomètres de profondeur. Ces deux manteaux seraient soumis à la convection.



LES AUTEURS



Dimitar SASSELOV est professeur d'astronomie à l'Université Harvard. Diana VALENCIA est postdoctorante à l'Observatoire de la Côte d'Azur à Nice ; elle a reçu le *Sagan Fellowship* 2010 de la NASA.

BIBLIOGRAPHIE

K. Hirose, L'ingrédient manquant de la Terre, *Pour la Science* n° 394, août 2010.

F. Bouchy, Super-Terres en vue, *Dossier Pour la Science* n° 64, juillet-septembre 2009.

D. Valencia et R. O'Connell, Convection scaling and subduction on earth and super-Earths, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 286, n° 3-4, pp. 492-502, 15 septembre 2009.

D. Valencia, R. O'Connell et D. Sasselov, Inevitability of plate tectonics on super-Earths, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 670, n° 1, pp. L45-L48, 20 novembre 2007.

C. O'Neill et A. Lenardic, Geological consequences of super-sized earths, *Geophysical Research Letters*, vol. 34, L19204, 11 octobre 2007.

D. Valencia, R. O'Connell et D. Sasselov, Internal structure of massive terrestrial planets, *Icarus*, vol. 181, n° 2, pp. 545-554, avril 2006.

deviennent rapidement plus froides. Ainsi, une super-Terre typique pourrait avoir un noyau de fer complètement solide, par conséquent, être dépourvue de champ magnétique global. Sur Terre, le champ magnétique nous protège des effets nocifs du vent solaire et des rayons cosmiques. Mais il n'est pas certain qu'il soit indispensable pour que la planète soit habitable.

Une planète riche en eau serait le siège de phénomènes encore moins familiers. Un profond océan envelopperait toute la surface de la planète. Or l'eau se transforme en glace quand on la refroidit, mais également quand on la comprime à des pressions élevées. Ainsi, au-dessus du manteau de silicate, un autre manteau solide de glace se formerait. Il ne s'agirait pas de glace ordinaire, mais de structures cristallines qui n'ont jusqu'à présent été observées qu'en laboratoire.

Riche en eau ou non, une super-Terre est par définition très massive et l'intérieur est soumis à des pressions inimaginables. Une planète massive sera donc plus dense qu'une planète moins massive de même composition. Dans des conditions aussi extrêmes, les matériaux rocheux deviennent encore plus durs que ceux qui se trouvent à l'intérieur de notre planète, et peut-être plus que le diamant. Comment le matériau de type terrestre se comporte-t-il à ces très hautes pressions ? Les géophysiciens tentent de mieux le comprendre à l'aide de modèles théoriques et d'expériences.

Une géodynamique active

Par exemple, ces dernières années, ils ont découvert qu'il existe dans les profondeurs de la Terre une nouvelle phase cristalline nommée postpérovskite. Si elle ne représente qu'une petite fraction du manteau terrestre, elle pourrait constituer l'essentiel du manteau des super-Terres. Des arguments théoriques suggèrent qu'il pourrait y avoir une phase encore plus dense.

Quand nous avons une idée de la structure et de la composition des différentes couches des super-Terres, nous avons fait la moitié du travail. L'étape suivante consiste à comprendre la dynamique de cette structure. En d'autres termes, à déterminer si la planète est géologiquement agitée, comme la Terre, ou presque morte, comme Mars.

Sur Terre, la convection du manteau est le moteur de la plupart des processus

géologiques. Sous les plaques qui forment la surface, le manteau chaud issu des profondeurs monte vers la surface, puis s'enfonce à nouveau quand il refroidit. Ces mouvements de convection – semblables à ceux de l'eau bouillante dans une casserole – transportent la chaleur interne vers la surface. La convection est nourrie en majeure partie par la désintégration d'éléments radioactifs dans le manteau, et pour le reste par la chaleur résiduelle de la formation de la planète. Les super-Terres rocheuses devraient avoir des concentrations semblables à celle de la Terre en éléments radioactifs, ou du moins en uranium et en thorium, car ces éléments sont distribués de façon uniforme dans la Galaxie et s'incorporent facilement aux planètes lors de leur formation. Par conséquent, étant plus grosses que notre planète et renfermant, en quantité absolue, davantage de matériau radioactif, les super-Terres devraient engendrer plus de chaleur interne, et ainsi abriter une convection du manteau plus vigoureuse.

Ce fort brassage a plusieurs conséquences, qui favorisent des conditions propices à la vie. L'une, contre-intuitive, est que des planètes plus grosses que la Terre ont des plaques tectoniques plus minces. La convection se manifeste en surface par la tectonique des plaques, qui sont entraînées par les mouvements du manteau. Les plaques sont peu épaisses au niveau des dorsales océaniques où elles se forment à partir de remontée de matériau fondu, puis elles s'épaississent en se refroidissant à mesure qu'elles se dirigent vers les zones de subduction, où elles replongent dans le manteau. D'après nos modèles, la convection des super-Terres engendre des forces plus importantes et un brassage plus rapide, de sorte que leurs plaques se déplacent plus vite : elles ont donc moins de temps pour refroidir et s'épaissir.

Étant plus minces, les plaques devraient se déformer plus facilement. Cependant, une gravité plus importante rendant les matériaux plus rigides, les failles tectoniques résistent mieux au glissement. Par conséquent, la résistance des failles ne varie pas trop avec la taille des planètes.

Ainsi, la tectonique des plaques semble plus facile à entretenir sur les super-Terres que sur des planètes rocheuses plus petites. C'est une condition favorable à la vie. Sur Terre, l'activité géologique en général, et le volcanisme en particulier, injecte

en continu du dioxyde de carbone et d'autres gaz dans l'atmosphère. Le CO₂ réagit avec le silicate de calcium, produisant du carbonate de calcium et du dioxyde de silicium, qui finissent par sédimenter sur le plancher océanique. À mesure que la croûte replonge par subduction dans le manteau, elle entraîne avec elle ces sédiments et réapprovisionne le manteau en carbone, dont une partie retrouve le chemin de l'atmosphère, et ainsi de suite. Ce cycle carbone-silicate fait office de thermostat pour réguler – via l'effet de serre – la température globale de la surface. Sur Terre, il contribue à maintenir les températures propices à l'eau liquide depuis des milliards d'années. De même, la tectonique recycle d'autres minéraux et gaz importants pour la vie, dont, par exemple, le sulfure d'hydrogène qui a pu servir de carburant à la vie avant l'apparition de la photosynthèse.

Terrain de choix

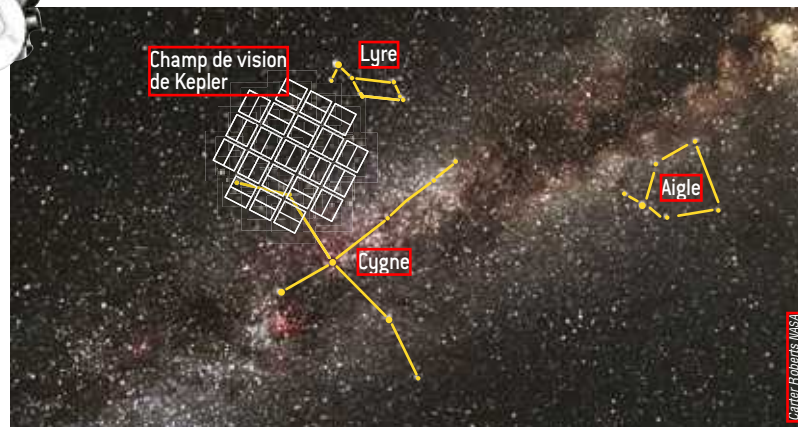
Sur une super-Terre, la durée de formation et la durée de vie des plaques raccourcissent, ce qui rend le cycle carbone-silicate plus rapide et moins sensible aux perturbations. À certains égards donc, les super-Terres pourraient être encore plus hospitalières pour la vie que les planètes de la taille de la Terre. De plus, leurs masses plus importantes ralentiraient la fuite de leur atmosphère et de l'eau dans l'espace. Ce phénomène de fuite est un réel problème pour les planètes plus proches de leur étoile que ne l'est Mars du Soleil.

En comparant la Terre aux modèles de super-Terres de différentes tailles, nous avons ainsi découvert un riche éventail de conditions de type terrestre stable pour des planètes telluriques. C'est cependant une famille où la Terre est reléguée à la marge. Plus petite, elle est plus vulnérable à maints égards. Et dans notre Système solaire, les petites planètes sont plutôt inactives d'un point de vue géologique. Si Vénus a peut-être une faible tectonique, Mars s'est figée très tôt, et ne dégaze aujourd'hui pas assez pour renflouer son atmosphère qui se raréfie. Si la taille de la Terre lui a permis d'échapper à ce sort, cela s'est apparemment joué à peu de chose. Néanmoins, malgré ces indices, on ne peut pas affirmer avec certitude que

FIXER DU REGARD 150 000 ÉTOILES



L'Observatoire spatial *Kepler* de la NASA, qui a été placé en orbite en 2009, est dédié à la recherche de nouvelles planètes. Sa mission est de scruter plus de 150 000 étoiles dans une région du ciel proche de la constellation du Cygne, en mesurant leur luminosité pour repérer les éventuels transits planétaires. Les 42 détecteurs de la caméra de *Kepler*, dont le champ de vision peut couvrir la Lune, ont une résolution totale de 95 mégapixels et peuvent détecter des baisses de luminosité de 0,01 pour cent seulement. Afin de distinguer les signaux véritables du bruit, *Kepler* doit suivre les mêmes étoiles pendant plusieurs années pour enregistrer plusieurs transits. *Kepler* a déjà découvert de nouvelles planètes, mais le meilleur est à venir !



la tectonique des plaques soit indispensable à la vie.

À quoi ressembleraient les paysages sur une super-Terre rocheuse (et non couverte d'un océan global) ? Au premier coup d'œil, ils ne seraient peut-être pas très différents de ceux de notre planète, en dehors d'éventuels signes de vie. Les processus géologiques y auraient engendré des continents, des montagnes, des océans et une atmosphère, avec des nuages, des intempéries, etc.

Cependant la tectonique des plaques étant jusqu'à dix fois plus rapide que sur Terre, les montagnes s'érigeraient de façon accélérée. En raison de la plus forte gravité, elles seraient aussi moins hautes (par comparaison, Mars, moins massive, porte la plus haute montagne du Système solaire, Olympus Mons, qui culmine à 21 kilomètres d'altitude). La composition de l'atmosphère pourrait également être différente à cause de l'activité volcanique plus intense et du rythme plus lent d'échappement des gaz atmosphériques dans l'espace.

L'ère de l'exploration à distance des super-Terres ne fait que commencer. Nous anticipons une riche moisson de découvertes grâce à la mission *Kepler*. L'étape

suivante consistera à étudier les atmosphères de ces planètes pour voir si l'on peut y détecter des signes de vie. Nous devons déterminer au moins deux choses : de quoi est constituée la planète, et quels gaz abondent dans son atmosphère, ce qui est lié à sa dynamique interne.

Par analyse spectroscopique de la lumière de ces planètes, on pourra y détecter la signature de molécules telles que l'eau, le dioxyde de carbone ou le méthane. Dans quelques années, le télescope spatial *James Webb* (successeur du télescope spatial *Hubble*) permettra d'observer en infrarouge les atmosphères des super-Terres. Les cibles seront sélectionnées parmi les plus intéressantes et les plus proches des planètes découvertes par *Kepler* et CoRoT. Et avec un peu de chance, les projets qui prolongeront ces missions mettront au jour quelques super-Terres à transit très proches de nous, et donc faciles à étudier. Sinon, il faudra construire des instruments capables de détecter la lumière directe des planètes telluriques et d'analyser leur atmosphère même lorsqu'elles ne transitent pas. C'est l'objectif des projets Darwin ou *Terrestrial Planet Finder*, qui verront sans doute le jour prochainement. ■

La toundra, la taïga et le **réchauffement**

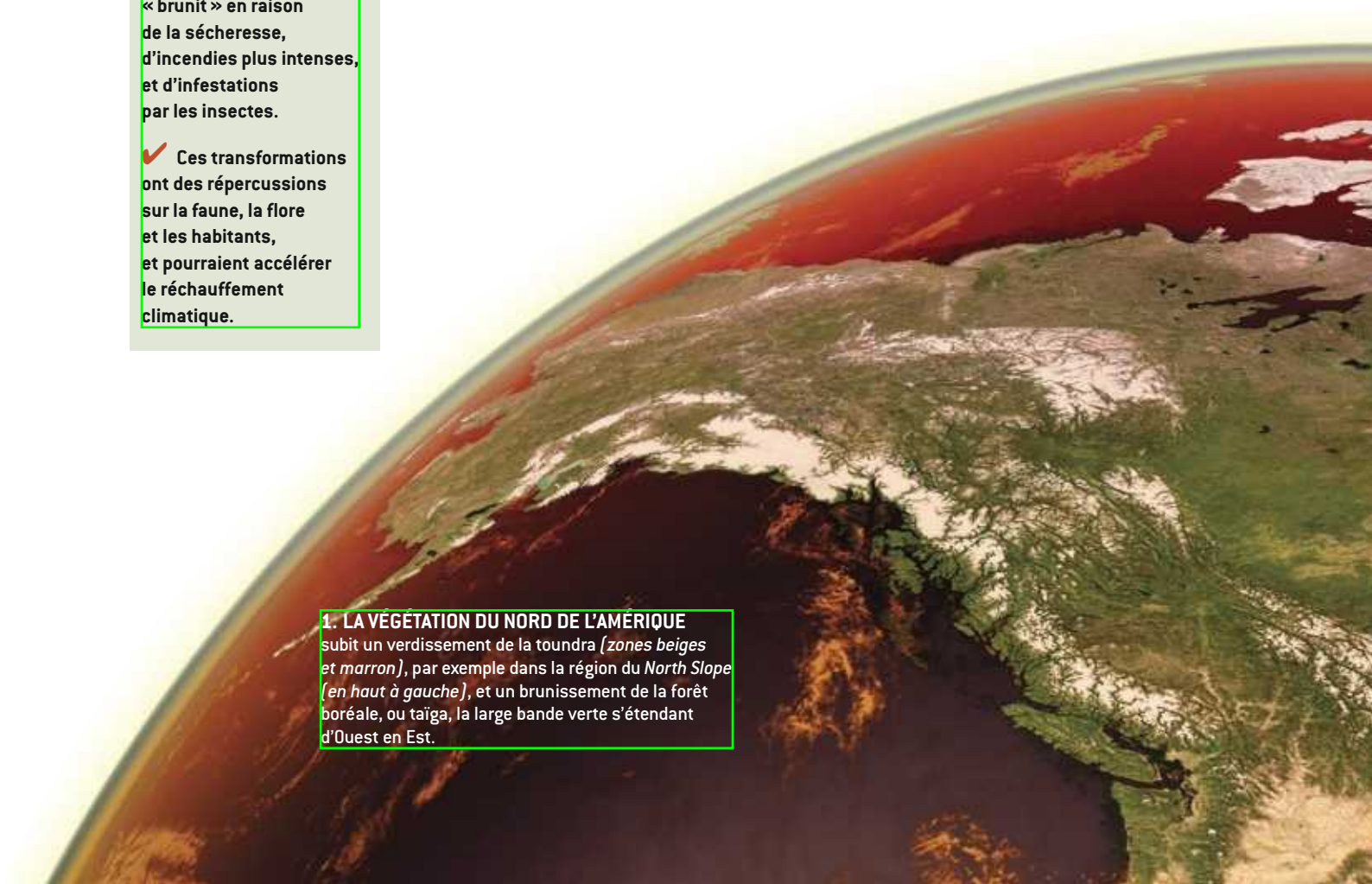
L'ESSENTIEL

- ✓ En comparant des photographies des années 1940 et des prises de vue récentes, on constate que les arbustes sont plus nombreux dans la toundra.
- ✓ La forêt boréale « brunit » en raison de la sécheresse, d'incendies plus intenses, et d'infestations par les insectes.
- ✓ Ces transformations ont des répercussions sur la faune, la flore et les habitants, et pourraient accélérer le réchauffement climatique.

Matthew Sturm

Dans les régions boréales, le réchauffement climatique réduit la surface occupée par les glaces, et modifie celle de la toundra et de la taïga.

1. LA VÉGÉTATION DU NORD DE L'AMÉRIQUE subit un verdissement de la toundra (zones beiges et marron), par exemple dans la région du North Slope (en haut à gauche), et un brunissement de la forêt boréale, ou taïga, la large bande verte s'étendant d'Ouest en Est.



climatique

A la fin de la Seconde Guerre mondiale, la marine américaine, à la recherche de nouveaux gisements de pétrole, entreprit de photographier le Nord de l'Alaska. Elle prit des milliers de clichés du *North Slope*, une région qui s'étend de l'océan Arctique jusqu'à la chaîne Brooks, située environ 500 kilomètres plus au Sud. Les vallées du versant méridional de cette chaîne, couvertes de forêts, furent également photographiées (voir l'encadré page 60). Cette série de photographies s'est révélée utile,

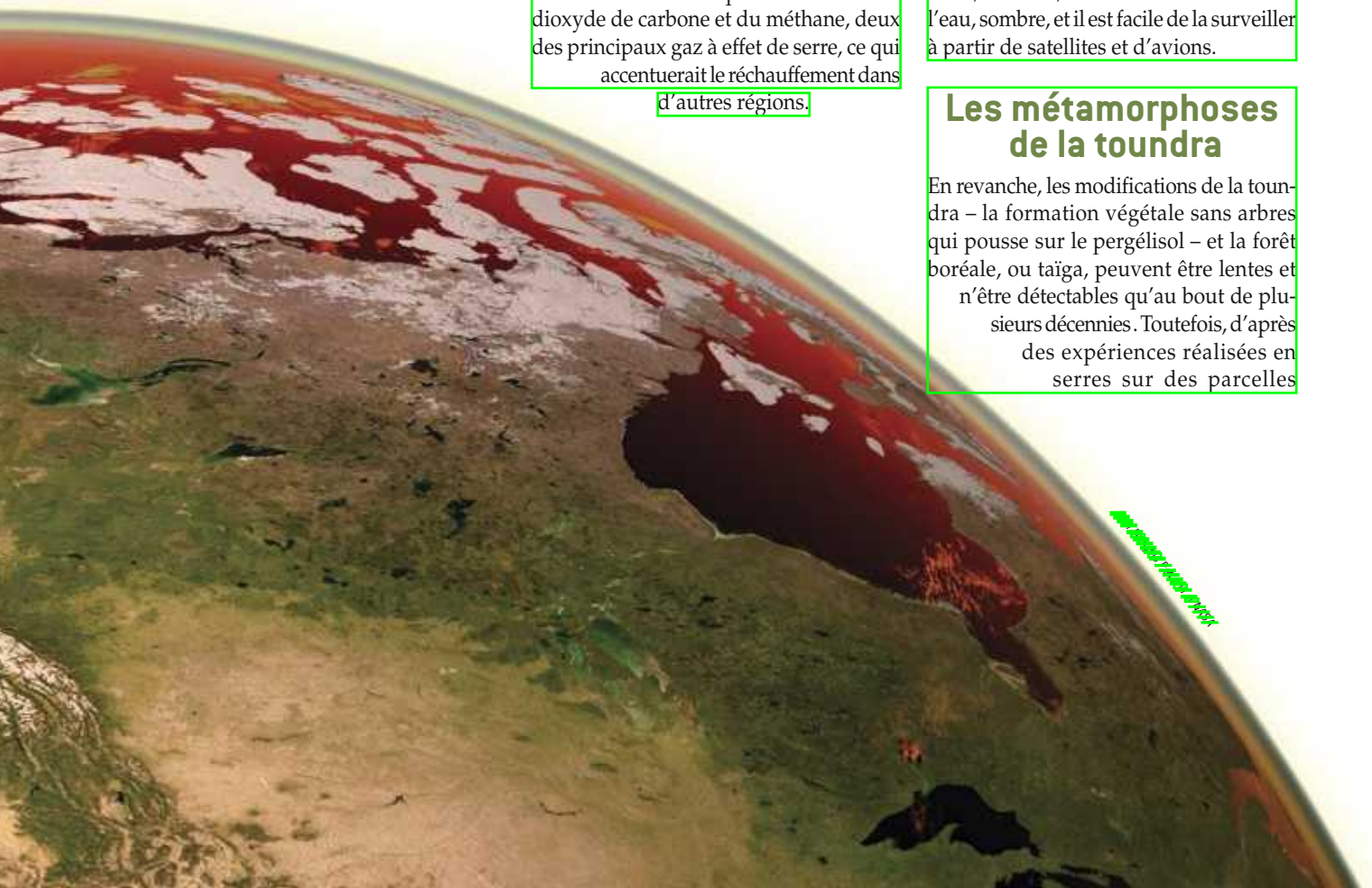
50 ans plus tard, pour comprendre comment les terres arctiques et subarctiques réagissent au réchauffement climatique. Cette connaissance est essentielle pour que les quatre millions de personnes qui vivent dans ces régions s'adaptent aux conséquences du réchauffement sur la chasse de subsistance, l'exploitation de la forêt, les transports et les infrastructures. Les transformations de la couverture végétale pourraient aussi avoir des répercussions globales. Par exemple, la fonte du pergélisol – le sol gelé en permanence qui caractérise les zones arctiques – libérerait du dioxyde de carbone et du méthane, deux des principaux gaz à effet de serre, ce qui accentuerait le réchauffement dans

d'autres régions.

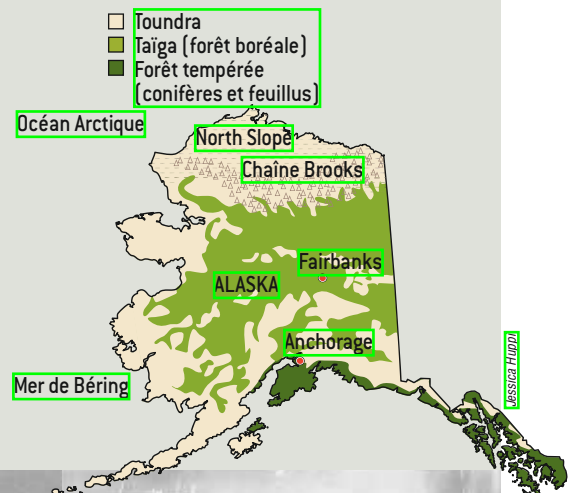
Bien avant qu'un ours polaire, juché sur une minuscule plaque de glace flottante, ne fasse la couverture du magazine *Time*, en 2006, on avait déjà compris que la glace arctique fondait. Dans les années 1990, ceux d'entre nous qui étudiaient les changements climatiques dans les régions boréales avaient de bonnes raisons de penser que la végétation arctique était aussi en train de changer. Mais les outils permettant de suivre ces modifications n'étaient pas aussi efficaces que ceux utilisés pour la glace de mer. Cette dernière, blanche, contraste fortement avec l'eau, sombre, et il est facile de la surveiller à partir de satellites et d'avions.

Les métamorphoses de la toundra

En revanche, les modifications de la toundra – la formation végétale sans arbres qui pousse sur le pergélisol – et la forêt boréale, ou taïga, peuvent être lentes et n'être détectables qu'au bout de plusieurs décennies. Toutefois, d'après des expériences réalisées en serres sur des parcelles



Un projet américain datant de la Seconde Guerre mondiale a permis de disposer de photographies qui nous permettent aujourd'hui de constater que la végétation arctique change. Craignant de manquer de pétrole, le gouvernement américain décida d'explorer le *North Slope*, une zone de neuf millions d'hectares du Nord de l'Alaska (zone en pointillés sur la carte ci-contre). Comme il n'existait aucune carte de cette région, les observateurs de la marine américaine prirent des milliers de photographies de très grande qualité. Ils volaient à basse altitude à bord d'un bimoteur *Beechcraft* (ci-dessous à gauche). Une caméra K-18, longue de près d'un mètre (ci-dessous à droite), était installée dans l'ouverture de la porte. Les négatifs, d'environ 23 centimètres sur 46, donneront des images si nettes que des empreintes de sabots d'élans y seront visibles. Des photographies ont été prises dans les années 2000 au-dessus des mêmes sites. En les comparant aux anciens clichés, on a pu constater que la végétation arctique s'était modifiée.



L'AUTEUR



Matthew STURM est chercheur au Laboratoire de recherche et d'ingénierie des régions froides (CRREL), l'un des centres de recherche et développement du Corps des ingénieurs de l'US Army (USACE), à Fairbanks, en Alaska.

de toundra, nous savions que la fertilisation et le réchauffement du sol accélèrent la croissance des arbustes au détriment des plantes non ligneuses, tels les roseaux et les mousses. Des bouleaux nains, par exemple, poussent à hauteur d'homme en quelques années.

6 000 clichés à exploiter

À partir de ces indices expérimentaux, nous estimions qu'en raison du réchauffement de la toundra, le nombre d'arbustes et la biomasse végétale devaient augmenter. Plus au Sud, dans la taïga, la ligne d'arbres avait progressé à la fois vers le Nord et en altitude, d'après des relevés historiques. Nous nous attendions donc à ce que le réchauffement accélère cette tendance.

À cette époque, dans les années 1990, différentes équipes de recherche essayaient de déceler des changements dans la végétation par télédétection satellitaire ou en étudiant des petites parcelles au sol. Avec Chuck (Charles) Racine, Kenneth Tape, deux collègues de Hanover, dans le New Hampshire, et de Fairbanks, en Alaska, nous avons pensé pouvoir apporter de

nouvelles informations sur ces changements en examinant d'anciennes photographies et en les comparant à des prises de vue actuelles. Restait à les trouver !

Un jour, un archiviste nous révéla qu'il avait sur ses étagères des photos aériennes de la marine américaine réalisées dans les années 1940. Ces clichés étaient parfaits pour notre projet, et magnifiques. Et il y en avait plus de 6 000 !

Notre étude a commencé au cours de l'été 2000, axée sur la toundra. La définition de la toundra, avec sa végétation rase et son pergélisol, ne rend pas bien compte de la complexité de cet écosystème. Recouvrant environ cinq pour cent des terres émergées du globe, elle forme un épais tapis de mousses, de lichens et de graminées, parsemé d'autres végétaux, d'arbrisseaux et d'arbres nains. Vu du ciel, cet assemblage ressemble à un tapis pelucheux, vert uni. Au sol, c'est une mosaïque spongieuse. Ce tapis n'est pas plat. Il s'y forme de petits monticules, parfois hauts d'une cinquantaine de centimètres, qui sont souvent instables.

Plus la latitude est élevée, plus la toundra devient clairsemée, jusqu'à ce que les arbustes disparaissent. Même les mousses

et les lichens finissent par laisser place à de vastes zones de sol dénudé, le désert polaire. Inversement, vers le Sud, la toundra est d'abord parsemée de quelques épicéas, puis vient une mosaïque de toundra et de forêt, et enfin la forêt boréale, la taïga. La transition entre les deux écosystèmes peut être abrupte, ou s'étendre sur des dizaines de kilomètres. En Alaska, cette frontière coïncide en grande partie avec le versant Sud de la chaîne Brooks.

Notre étude comparative exigeait donc de nouvelles photographies. En hélicoptère, munis de copies des anciens clichés, nous avons photographié à nouveau plus de 200 zones du *North Slope* au cours de quatre étés. Image après image, nous avons constaté que les arbustes, parfaitement identifiables, étaient plus gros que 60 ans plus tôt. Des bosquets s'étaient étendus dans la toundra là où la taille des arbustes était jadis inférieure à notre limite de détection, soit environ 50 centimètres de haut. Le saule, le bouleau et l'aulne, les trois principales essences de l'Arctique, avaient conquis de nouvelles surfaces et grossi. Des «troupes de choc» formées de ces arbustes avaient envahi les terrasses bordant d'anciennes rivières, colonisant des hectares de territoire en quelques décennies seulement.

L'Arctique arbustif

Sur le terrain, cette transformation s'est vue confirmée. Les arbustes qui apparaissaient comme de petites taches noires sur nos clichés étaient en fait aussi grands qu'un homme. Souvent, ils étaient entourés de groupes d'arbrisseaux, que l'arbuste semblait protéger des vents violents et des tempêtes de neige. En certains endroits, des fourrés impénétrables s'étaient formés. À la fin du deuxième été, après avoir battu la campagne à travers des dizaines de ces fourrés, nous avons qualifié ces zones

d'«Arctique arbustif». Au total, les arbustes s'étaient disséminés sur plus de 200 000 kilomètres carrés en Alaska.

Mais que se passait-il dans la toundra située hors de l'Alaska et dans les forêts de la taïga, plus au Sud ? Pour répondre à cette question, des climatologues ont utilisé les radiomètres embarqués dans les satellites météorologiques de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). En calculant l'indice de végétation normalisé, ou NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), fondé sur la réflexion par la végétation du rouge et du proche infrarouge, ils ont découvert que la toundra verdissait, autrement dit que sa biomasse augmentait. La composante arbustive de la toundra était donc en expansion.

Cet indice de végétation augmentait davantage en Alaska arctique, à l'Ouest du Canada et en Sibérie, mais aussi en Scandinavie et dans d'autres régions de l'Arctique. D'autres collègues trouvèrent des résultats similaires, tandis que les souvenirs d'habitants de régions arctiques, en Alaska, au Canada et en Russie, confirmèrent que le nombre d'arbustes avait crû sur l'ensemble de l'Arctique.

En comparant les données satellitaires les plus récentes sur le verdissement et nos clichés aériens, nous avons découvert que la toundra compte aussi davantage d'arbrisseaux (dont la taille est inférieure à la limite de photodétection). Ces petits arbustes, situés entre les monticules, sont omniprésents et ont une certaine faculté d'adaptation : leur croissance s'accélère quand les conditions s'améliorent. Ces mini-arbustes étant déjà présents sur une vaste zone, la biomasse croît sûrement plus vite qu'auparavant.

Un tel phénomène de croissance arbustive n'est pas sans précédent. D'après les pollens retrouvés dans des carottes

Petit lexique de l'Arctique

✓ Toundra

Formation végétale de l'Arctique dépourvue d'arbres, caractérisée par une végétation dense et rase. Le sous-sol y est gelé en permanence.

✓ Taïga ou forêt boréale

Forêt caractéristique des régions situées juste au Sud du cercle polaire arctique. Elle ne s'étend pas vers le Nord au-delà d'une température moyenne du mois le plus chaud inférieure à 10 °C. Composée surtout de conifères (pins, épicéas, sapins et mélèzes) et de feuillus (peupliers faux-trembles, bouleaux, saules) le long des cours d'eau, elle constitue le plus vaste écosystème du monde.

✓ Albédo

Fraction de la lumière reçue qui est réfléchi par un corps ou une surface. La neige et la glace, excellents réflecteurs, renvoient dans l'espace, selon leur âge, entre 50 et 90 pour cent de la lumière solaire, limitant ainsi le réchauffement du sol.

2. LA FONTE DU PERGÉLISOL

provoque la formation de ravines typiques d'une morphologie géologique nommée thermokarst. Ces structures, photographiées ici dans les années 1940 par la marine américaine le long de la rivière Colville, sur le flanc Nord de la chaîne Brooks, accumulent de la neige, et influencent le régime hydrologique de la toundra.





3. EN COMPARANT DES PHOTOGRAPHIES
prises dans le Nord de l'Alaska, l'une dans les années 1940 (*en haut*) et l'autre à la même époque de l'année au début des années 2000, nous avons constaté que la couverture végétale augmentait. La seconde photographie, datant de 2002, montre des arbustes de la taille d'un homme, sortes de « troupes de choc » qui progressent sur la toundra (*rectangle blanc*), là où ils n'existaient pas 60 ans plus tôt.

de sédiments, les arbustes ont envahi la toundra il y a environ 8000 ans, un phénomène connu sous le terme d'« explosion de bouleaux ». Les données satellitaires ont fourni un résultat encore plus surprenant pour la taïga. Bien que des études aient confirmé que le front d'arbres se déplace vers le Nord et en altitude, les forêts perdent de la biomasse et deviennent moins productives à l'arrière de ce front. Elles brunissent tandis que la toundra verdit, ce qui semble contredire l'idée que la forêt réagit au réchauffement climatique en augmentant sa biomasse.

Il y a une dizaine d'années, Glenn Juday et Martin Wilmking, alors à l'Université de Fairbanks, ont rassemblé des échantillons d'anneaux de croissance d'arbres de la région. Au lieu que des températures plus élevées améliorent le développement, et par conséquent l'épaisseur des anneaux de croissance, ils ont constaté que les cernes de croissance étaient plus petits, ce qui montre que ces arbres avaient poussé plus lentement. En effet, dans l'Ouest de l'Alaska, où le temps est plus humide, les arbres se développent plus vite lorsque la température augmente ; mais à l'Est, le pays est plus sec en été, de sorte que les peuplements d'arbres poussent moins vite, voire dépérissent si l'été est très chaud.

À partir des mesures d'anneaux de croissance qu'ils ont pu retrouver, deux autres spécialistes de dendrochronologie ont confirmé que le brunissement de la

taïga concerne bien toute la région arctique et toutes les espèces d'arbres. Le brunissement s'observe le plus souvent dans des sites secs et dans la partie méridionale du domaine de chaque espèce. On peut en conclure que la sécheresse et la chaleur sont les principaux coupables.

Un brunissement généralisé

Deux autres causes sont en jeu, vraisemblablement liées au réchauffement climatique : la fréquence et l'intensité des feux de forêts et des invasions d'insectes. En Alaska, les grands feux de forêt semblent survenir tous les cinq ans environ, alors que leur fréquence était auparavant plus proche de dix ans. Les attaques d'insectes, tel le dendroctone de l'épinette (*Dendroctonus rufipennis*), ont ravagé plus de 500 000 hectares de forêt en Alaska ces 30 dernières années. Elles semblent s'intensifier depuis, en raison d'hivers plus doux et d'étés plus chauds qui favorisent la survie des larves et accélèrent le cycle de vie des insectes.

Les forêts boréales ont gagné, selon les estimations, 11 600 kilomètres carrés sur la bordure Sud de la toundra en 50 ans. Mais durant la même période, elles se sont asséchées, ont brûlé et ont été endommagées au Sud du front de progression. Ces évolutions contraires risquent de transformer la forêt en prairie. Dans le même temps, les arbustes se multiplient

✓ SUR LE WEB

Arctic Climate Impact Assessment (ACIA) :
<http://amap.no/acia/>

ArcticNet :
<http://www.arcticnet.ulaval.ca/index-fr.php>

State of the Arctic Conference 2010 :
<http://soa.arcus.org/>

International Tundra experiment (ITEX) :
<http://www.geog.ubc.ca/itex/>

Quelques autres clichés pris en Alaska par la marine américaine :
<http://www.ScientificAmerican.com/arctic-plants>

dans la toundra. La forêt va-t-elle se métamorphoser en toundra, et cette formation végétale en forêt ?

Nous comprenons encore mal les mécanismes de ces évolutions. Les modèles prédictifs sont imparfaits. Ainsi, alors que la glace de mer dans l'Arctique suit des lois physiques, la quantité de glace a diminué deux fois plus vite que ne le prévoyaient 13 des meilleurs modèles à grande échelle. Selon les prévisions actuelles, l'océan Arctique aura perdu ses glaces d'ici 40 ans, mais ces prévisions sont plus des extrapolations des changements observés que les résultats de modèles.

Quant à la toundra et à la taïga, leur complexité biologique et les mécanismes parfois opposés qui contrôlent la croissance végétale empêchent les modèles actuels de fournir des prévisions précises.

Une croissance ancienne qui s'accélère

Nous avons essayé d'aborder ce problème pour les arbustes de la toundra en utilisant un modèle simple de croissance et notre étude comparative des photographies aériennes. Nous nous attendions à ce que l'expansion de la toundra arbustive coïncide avec le réchauffement rapide de l'Arctique, qui s'est produit depuis les années 1970. Mais le modèle indiquait qu'elle avait commencé il y a 150 ans environ, à la fin du « Petit Âge glaciaire » qui a marqué l'Europe et l'Amérique du Nord

de 1550 à 1860. Cela correspondait exactement à la première apparition, dans la région du *North Slope*, des élans, qui brouettent les arbustes.

Ainsi, les arbustes ont progressé lentement en réponse à un cycle de réchauffement naturel amorcé bien avant la révolution industrielle. Cependant, d'autres indices suggèrent que cette expansion se poursuit et s'accélère, en raison du réchauffement dû aux activités humaines. Durant 40 ans, dans les régions où les arbustes se sont multipliés, les glaciers ont reculé, le réchauffement du pergélisol s'est accéléré et le printemps commence plus tôt, comme l'indiquent les dates de gel et de dégel des rivières et des lacs. Malheureusement, il est peu probable que nous trouvions une collection de photographies datant des années 1900, ce dont nous aurions besoin pour établir que l'expansion des arbustes s'est accélérée depuis 1950.

Le même modèle prévoit qu'il faudra 150 ans pour que les zones de toundra arbustive soient complètement recouvertes d'arbustes ; là où la toundra reste rase, cela prendra encore plus de temps. Toutefois, ces prévisions ne prennent pas en compte les effets catastrophiques des incendies, qui pourraient modifier la végétation : les arbustes ont tendance à prospérer dans les zones perturbées par le feu. Et il existe sans doute des rétroactions qui pourraient accélérer le changement.

Je crois que le paysage de toundra risque de changer bien plus vite que ne le prévoit notre modèle grossier, en raison

BIBLIOGRAPHIE

A. L. Swann *et al.*, *Changes in Arctic vegetation amplify high-latitude warming through the greenhouse effect*, *PNAS*, vol. 107, pp. 1297-1300, 2010.

H. Baltzer, *Environmental Change in Siberia*. *Earth Observation, Field Studies and Modelling*, Springer, 300 p., 2010.

B. C. Forbes *et al.*, *Russian arctic warming and « greening » are closely tracked by tundra shrub willows*, *Global Change Biology*, vol. 16, pp. 1542-1554, 2009.

J. M. G. Hudson et G. H. R. Henry, *Increased plant biomass in a high Arctic heath community from 1981 to 2008*, *Ecology*, vol. 90, pp. 2657-2663, 2009.

D. Blok *et al.*, *Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra*, *Global Change Biology*, vol. 16, pp. 1296-1305, 2009.

D. Verbyla, *The greening and browning of Alaska based on 1982-2003 satellite data*, *Global Ecology and Biogeography*, vol. 17, pp. 547-555, 2008.



4. EN SERRE, SI L'ON RÉCHAUFFE le sol, les arbustes de la toundra poussent jusqu'à hauteur d'homme (*ci-dessus, le toit de la serre a été enlevé*). Ceux qui poussent sur un sol non chauffé ne dépassent pas 50 centimètres. Dans la nature (*à gauche*), de plus en plus d'arbustes atteignent une hauteur d'homme. Ces arbustes protégeraient les plus petits du vent et de la neige et favoriseraient une croissance en cercles concentriques autour d'eux (*lignes jaunes*).

La Sibérie brûle aussi

La recrudescence des feux de forêts et de toundra touche d'autres régions que l'Alaska. Ainsi, en Russie, où la forêt occupe 800 millions d'hectares, soit 47 pour cent du territoire, on a enregistré en 2010 près de 30 000 incendies. Plus de 11 millions d'hectares se sont consumés, d'après le Centre global de suivi des incendies (GPMC), à Freiburg.

Le feu de forêt ou de toundra est banal en Russie. L'année 2010 n'est exceptionnelle que par la canicule qui a sévi en juillet (jusqu'à 42 °C dans certaines régions) et parce que les incendies ont frappé les régions urbanisées, provoquant une cinquantaine de morts. En 2009, au contraire, la majorité des feux (15 millions d'hectares) ont concerné les zones peu habitées de Sibérie orientale, comme c'est le cas généralement.

Depuis une vingtaine d'années, les incendies touchent des régions de plus en plus septentrionales, tels la Yakoutie, au Nord-Est de la Sibérie, et le Kamtchatka, en Extrême-Orient. En

outre, ils sont plus précoces, se manifestant dès mars, ce qui surprend les populations, habituées à de longs hivers. Un climat plus chaud et sec augmente le risque naturel d'incendie. De fait, une équipe de l'Institut Sukachev de la forêt a montré en 2005 que la probabilité qu'une même zone de Sibérie soit touchée par un feu était d'une fois tous les 100 ans au XX^e siècle, alors qu'elle est aujourd'hui d'une fois tous les 65 ans, en moyenne. Selon le Centre Hadley de météorologie du Royaume-Uni, la forêt boréale pourrait être remplacée progressivement par une végétation arbustive de steppe. On a observé par ailleurs, en Yakoutie, que les feux de toundra sont plus fréquents.

Quelles sont les causes des feux de forêt en Russie ? La première est la combustion spontanée des tourbières. Ces écosystèmes émettent des gaz qui tendent à s'enflammer par forte chaleur ; les feux y couvent et peuvent se propager aux forêts voisines. La foudre est l'autre facteur déclenchant. Les activi-

tés humaines et les pyromanes viennent en troisième lieu, sauf en 2010 où les incendies ont touché plus de zones habitées que d'ordinaire. La désorganisation du système de gestion centralisé de forêts qui prévalait jusqu'en 2000 a été aussi montrée du doigt, à juste titre.

Les conséquences des feux de forêts varient selon les régions. À l'Est, où la forêt est exploitée par des sociétés russes et coréennes, la surface forestière tend à augmenter. On manque de données pour le reste du territoire. Quoi qu'il en soit, la population russe commence à prendre conscience du risque de voir partir en fumée sa forêt. Celle-ci n'est plus une « mer sans fin », les feux qui l'embrassent ont désormais des conséquences tangibles. Avec les incendies de 2010, et alors que le réchauffement accentue ce risque naturel, il est possible que la Russie réfléchisse enfin aux moyens de gérer durablement ses forêts.

Marie-Hélène Mandrillon,
CERCEC, CNRS-EHESS, Paris

des incendies. Par exemple, de juillet à septembre 2007, au cours d'une saison exceptionnellement sèche, le plus grand incendie de toundra jamais enregistré, provoqué par la foudre, a consumé plus de 100 000 hectares du *North Slope*. En 2009, en de nombreux endroits, des arbustes avaient déjà repoussé. Dans des zones de toundra brûlées auparavant, à l'Ouest de l'Alaska, l'étendue de la couverture arbustive a été multipliée par huit en 30 ans. Or une augmentation des impacts de foudre et de la sécheresse risque de déclencher plus d'incendies. En outre, les arbustes, avec leur biomasse et leurs ramifications plus importantes, brûlent facilement, ce qui accroît le risque.

Parmi les autres effets rétroactifs qui peuvent stimuler la croissance des arbustes dans la toundra, deux sont liés à la couverture neigeuse hivernale. Il peut sembler paradoxal que l'hiver favorise la croissance des arbustes, puisque ceux-ci grandissent en été. En fait, l'hiver influe sur les conditions du sol et la quantité d'eau disponible pour la saison suivante. La toundra est recouverte de neige neuf mois par an, et la taïga sept mois.

Quand la neige réchauffe

Là où des arbustes arrivent à recouvrir tous les monticules de la toundra, ils « piègent » la neige, produisant des congères qui épaississent la couverture neigeuse autour d'eux. La neige est un excellent isolant : une couche de neige peut contenir jusqu'à 75 pour cent d'air. Là où elle est plus épaisse et donc plus isolante, les températures du sol sont plus élevées qu'elles ne le seraient autrement.

Ainsi, dans certaines zones arbustives, nous avons mesuré des températures à la base de la couche de neige supérieures de 10 °C à celles des zones adjacentes. Cette douceur prolonge l'action des micro-organismes du sol au cours de l'hiver et favorise la dégradation de la matière organique en éléments nutritifs. Les arbustes peuvent stocker davantage de nutriments. Quand vient l'été, ils sont plus robustes, croissent vigoureusement et deviennent plus grands ; ils peuvent alors piéger plus de neige l'hiver suivant, renforçant le processus.

L'autre effet rétroactif lié à la neige provient de l'albédo, c'est-à-dire de sa réflectivité. Les branches noires des grands



ALBERT STOCK

5. LES GRANDS INCENDIES DE FORÊT semblent survenir plus fréquemment dans les régions arctiques, et ils sont plus intenses. Ces feux, ainsi que les dégâts causés sur des dizaines de millions d'arbres par les insectes, ont pour effet de « brunir » la forêt boréale. Or les arbustes prospèrent dans ces zones brûlées. Leurs ramifications plus importantes augmentent le risque d'incendies de grande envergure et, par-là, la probabilité que les arbustes prolifèrent encore.

arbustes absorbent beaucoup plus d'énergie solaire que la neige blanche, suffisamment pour provoquer localement un réchauffement et accélérer la fonte de la neige au printemps ; cela a pour effet d'avancer la saison de croissance végétale et de stimuler les arbustes, qui deviennent encore plus grands.

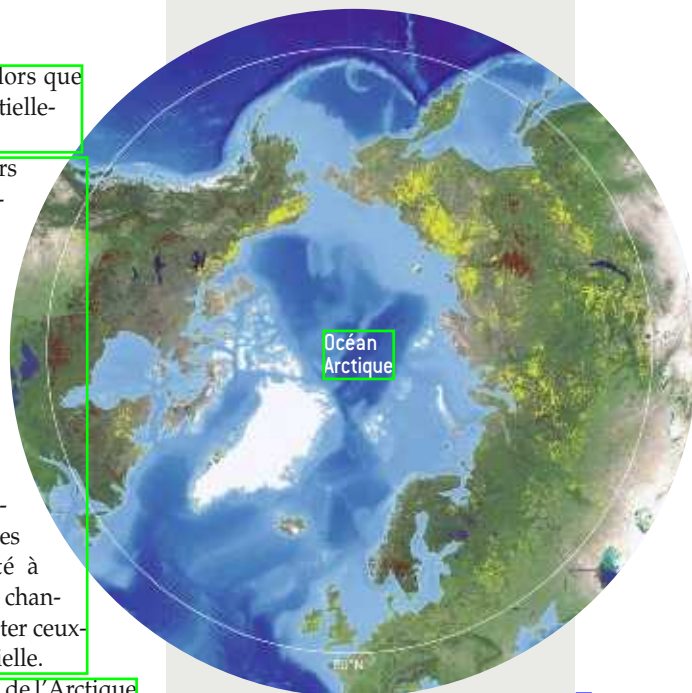
Les effets rétroactifs ne sont pas indépendants les uns des autres, ni des mécanismes de croissance estivale, de sorte que leur effet global est difficile à prévoir. Par exemple, les épaisses congères qui se forment près des arbustes devraient en principe mettre plus de temps à fondre que la neige plus mince des alentours. L'effet de fonte dû à l'absorption d'énergie par les branches des arbustes peut-il surpasser l'inhibition de la fonte due à l'épaisseur de la neige ? Ou bien est-ce l'inverse, ce qui freinerait la croissance de la végétation ?

En été, les ombres et les litières de feuilles ont aussi des effets antagonistes. L'ombre due à la canopée des grands arbustes abaisse les températures du sol, ce qui freine l'action microbienne stimulée par les congères en hiver, et ainsi la

croissance des arbustes, alors que les litières stimulent potentiellement cette croissance.

De nombreux chercheurs tentent de modéliser ces différents effets afin de mieux prévoir les transformations de la toundra et de la taïga. Certains paramètres clés restent inconnus, par exemple l'évolution de la quantité de neige qui tombera dans les régions arctiques. Les seuls modèles informatiques ne permettront pas de répondre à ces questions. Notre capacité à mesurer physiquement les changements en cours et à projeter ceux-ci dans l'avenir sera essentielle.

Comment la végétation de l'Arctique évoluera-t-elle ? À quelle vitesse ? Les écosystèmes concernés sont si complexes qu'il sera difficile d'obtenir un modèle prédictif fiable. Mais si nous ne nous attelons pas à la tâche dès maintenant, nous serons incapables d'anticiper les conséquences de ces évolutions.



6. CETTE CARTE DE L'ARCTIQUE a été établie d'après des données satellitaires. Les zones couvertes d'arbustes se sont agrandies (en vert clair), alors que la taïga s'est asséchée et comprend moins d'arbres (en brun).

SOURCE: COPELAND/NOAA RESEARCH CENTER



Research

- Salon européen des carrières de la recherche
- Europäische Messe für Forschung und Karriere
- European research career fair



Paris

19 novembre 2010
November 19, 2010

- **60 exposants**
Entreprises, centres et laboratoires de recherches, campus européens
- **60 exhibitors**
Companies, Research centres and laboratories, European campuses
- **5 conférences**
5 conferences

L'événement européen de votre carrière

The European event dedicated to your career

- **Recrutement / Recruitment**
- **Conseils / Advice**

Pré-inscription et informations sur:
Registration and information online:
www.ResearchCareerFair.com





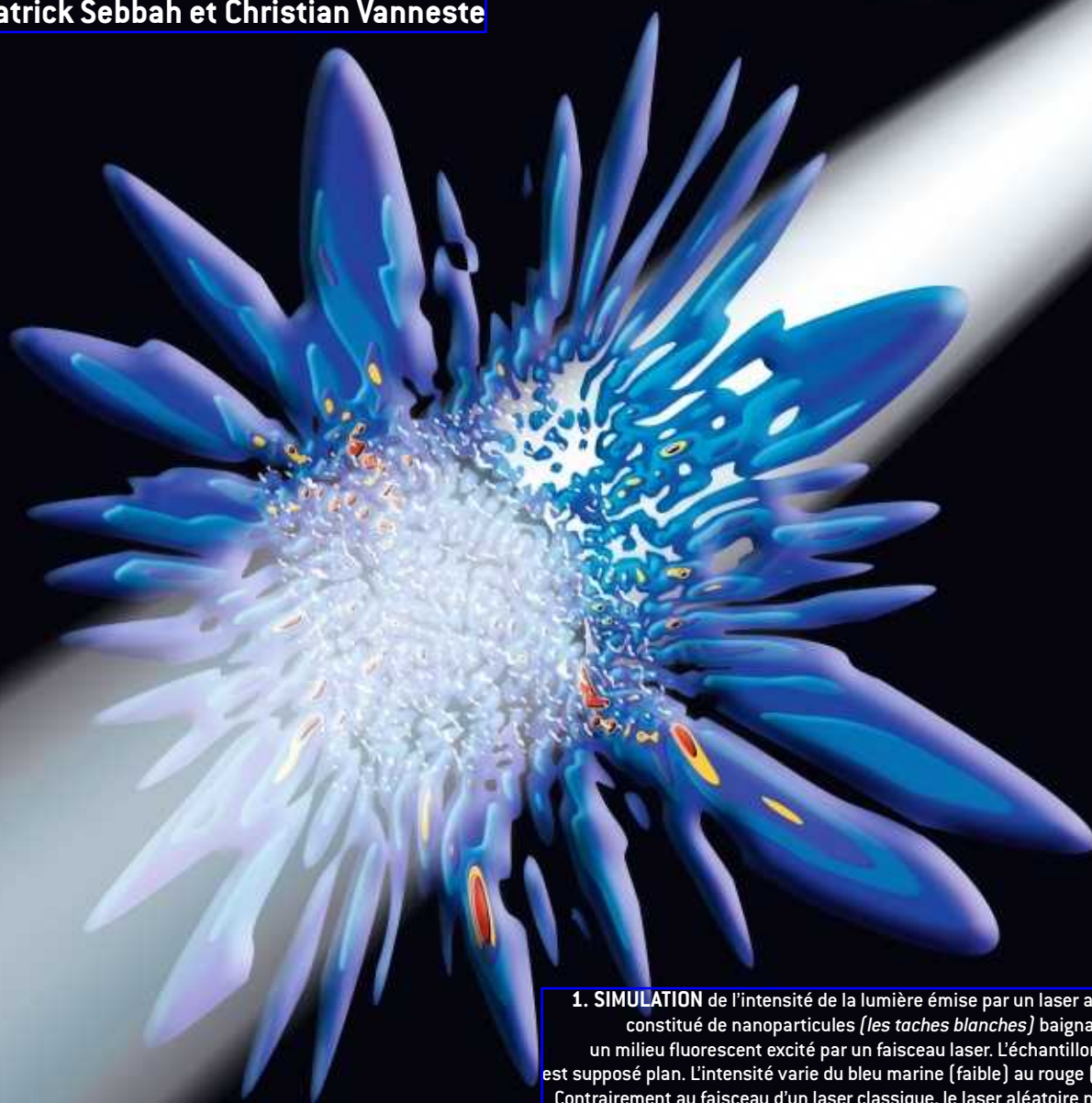





Physique

Le laser aléatoire : un vrai laser ?

Patrick Sebbah et Christian Vanneste



1. SIMULATION de l'intensité de la lumière émise par un laser aléatoire constitué de nanoparticules (*les taches blanches*) baignant dans un milieu fluorescent excité par un faisceau laser. L'échantillon, carré, est supposé plan. L'intensité varie du bleu marine (faible) au rouge (haute). Contrairement au faisceau d'un laser classique, le laser aléatoire n'est pas directionnel. Il dépend néanmoins de la géométrie du système, émettant par exemple dans un plan lorsque l'échantillon est bidimensionnel.

Tous les lasers conventionnels fonctionnent selon le même principe : un milieu « actif », constitué d'un gaz, d'un liquide ou d'un solide, amplifie la lumière au sein d'une cavité optique formée en général de deux miroirs se faisant face. Cette cavité est essentielle, car, en forçant la lumière à

À ce jour, de nombreux pays, en particulier asiatiques, explorent les applica-

À ce jour, de nombreux pays, en particulier asiatiques, explorent les applica-

Des milieux diffusants et désordonnés peuvent engendrer un effet laser. Ces nouveaux lasers suscitent l'intérêt tant des chercheurs que du monde industriel.

Dans ces milieux, la lumière ne se propage plus en ligne droite, mais suit une marche aléatoire (en zigzag) qui lui permet d'y séjourner plus longtemps avant de s'en échapper. Une nouvelle classe de lasers est née, où le milieu diffusant remplace la cavité optique du laser. Appelées « poudres laser », puis « lasers sans miroirs » ou encore « peintures laser », ces sources lumineuses ont finalement pris le nom de « lasers aléatoires ». Depuis, l'effet « laser aléatoire » a été observé dans tout le spectre lumineux et démontré dans de nombreux systèmes (voir les figures 3 à 7) : nanocristaux, opales dopées, fibres optiques, nanopiliers, cristaux photoniques aléatoires, voire des tissus organiques comme le blanc de poulet !

tions potentielles des lasers aléatoires : peintures laser, marquage, fabrication simplifiée de sources laser ultracompactes, détection de tumeurs... D'un point de vue plus fondamental, l'effet « laser aléatoire » soulève aussi des questions importantes comme la nature du champ laser dans ces systèmes sans cavité – a-t-il les mêmes caractéristiques que le champ laser classique ? –, à tel point que la théorie du laser a dû être récemment dépoussiérée pour inclure ce nouveau type de « laser ouvert ».

Dans un laser classique, les deux propriétés importantes de la lumière laser – sa pureté spectrale et la directivité de son émission – résultent de l'association du milieu actif et de la cavité optique (*voir la figure 2*). Comment, alors, obtenir une émission laser sans cavité? Pour le comprendre, examinons ces deux propriétés du laser et la façon dont elles sont obtenues dans un laser classique.

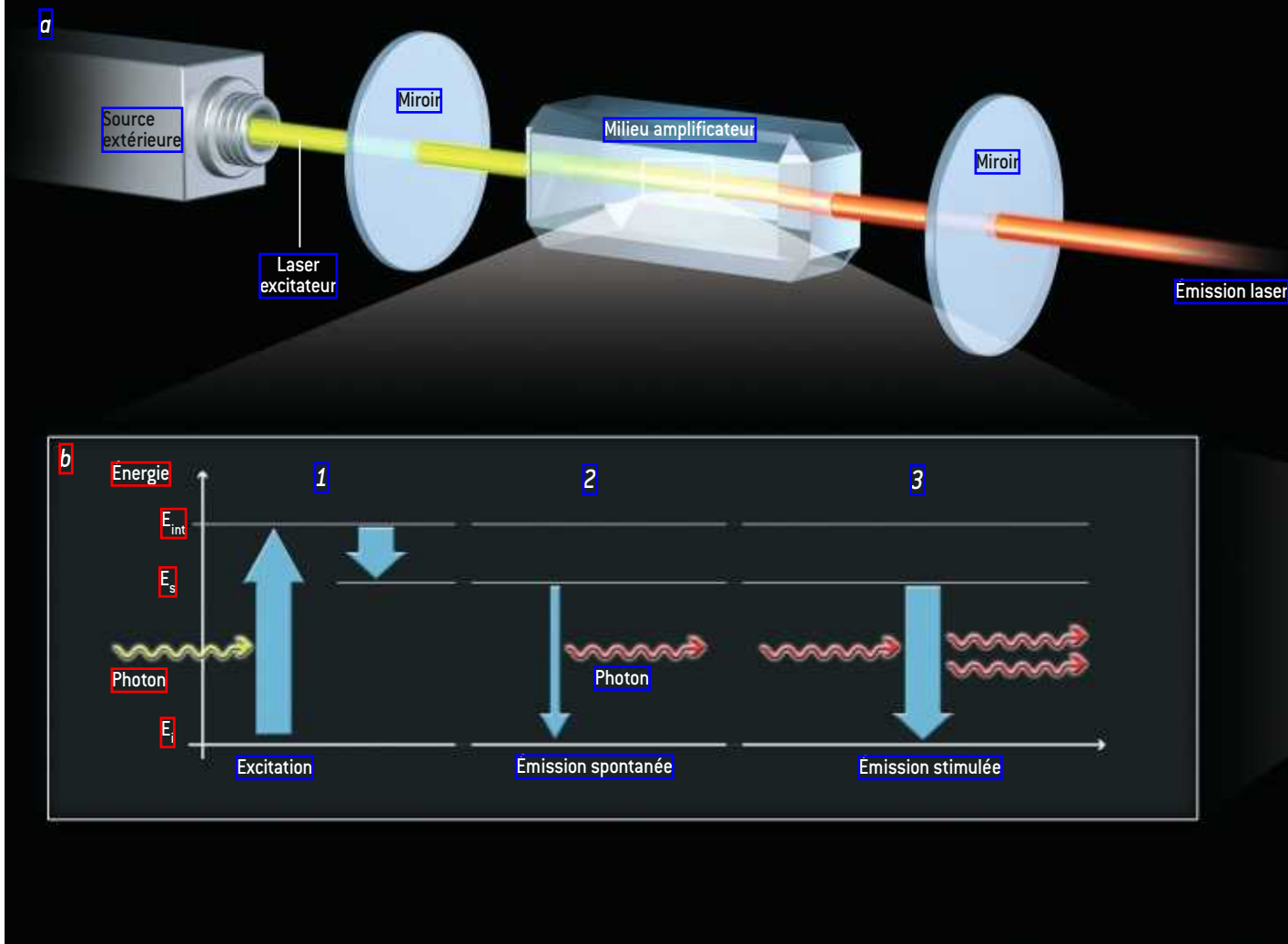
Le milieu actif est constitué d'atomes portés dans un état d'énergie supérieur par excitation optique ou électrique (*voir*

✓ L'effet « laser aléatoire » repose sur l'association d'un milieu actif, amplificateur de lumière, à un milieu diffusant ouvert, et non à une cavité optique, comme dans un laser classique.

✓ Malgré l'absence de cavité, la lumière émise par les lasers aléatoires a toutes les caractéristiques d'une émission laser, hormis sa directivité.

✓ Plus maniables, ces nouveaux lasers offrent des perspectives en médecine et dans le domaine non visible du spectre lumineux.

✓ Les fondements de la physique des lasers doivent être revisités.



Émission spontanée, émission stimulée

Le cœur du laser est constitué d'un ensemble d'atomes sous forme solide, liquide ou gazeuse qui constitue le milieu actif. Ces atomes sont généralement identiques et, parmi tous leurs états énergétiques possibles, une paire d'états i et s , d'énergies respectives E_i et E_s , se révèle plus favorable que les autres pour l'émission laser. Une fois excités, c'est-à-dire portés dans l'état d'énergie supérieure, les atomes amplifient, par le processus d'émission stimulée, les photons qui les traversent (voir la figure 2).

Dans ce processus, un photon d'énergie $E_s - E_i$ incident qui frappe un atome excité dans l'état s provoque ou « stimule » la désexcitation de cet atome dans l'état i ; cet atome émet un photon identique au photon incident. On obtient ainsi deux photons ayant la même direc-

tion et la même énergie $E_s - E_i$ (ou même longueur d'onde). Ceux-ci à leur tour pourront provoquer la désexcitation d'autres atomes excités dans l'état s , créant ainsi en cascade un faisceau de photons identiques.

Pourquoi a-t-on de l'émission spontanée dans le cas des sources incohérentes et de l'émission stimulée dans le cas des lasers, alors qu'initialement, on se trouve dans les deux cas en présence d'une population d'atomes excités ? La réponse est que les deux processus d'émission spontanée et stimulée sont toujours à l'œuvre, mais avec des poids différents selon les situations. L'émission stimulée entre deux niveaux s et i domine lorsque le nombre d'atomes excités dans l'état s est supérieur au nombre d'atomes dans l'état i , situation désignée sous le nom d'inversion

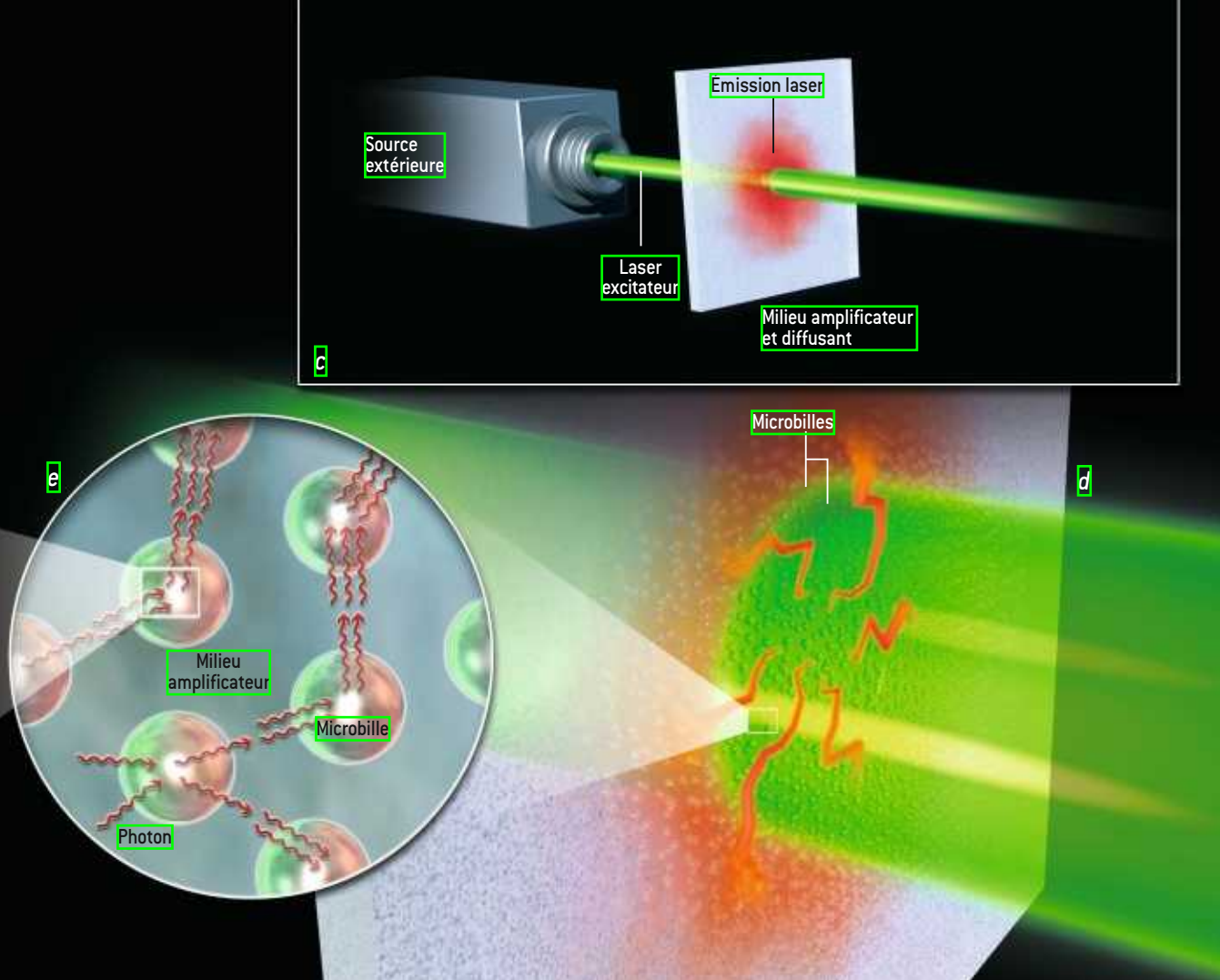
de population. Le mécanisme d'excitation des sources ordinaires est souvent d'origine thermique et ne peut conduire à une inversion de population.

Dans les lasers, on utilise un mécanisme d'excitation optique, électrique ou chimique qui porte les atomes dans l'état d'énergie supérieur E_s . Le milieu ainsi excité amplifie toute onde dont la fréquence correspond à l'énergie de photon $E_s - E_i$. Il peut être décrit par une courbe d'amplification (courbe de gain) en forme de cloche centrée sur cette fréquence, dont la largeur est liée à l'incertitude avec laquelle est définie l'énergie du photon émis. Le rapport de la largeur de la courbe et de la valeur de la fréquence varie de $1/10^6$ à $1/100$ selon les matériaux, ce qui fait d'un tel milieu un amplificateur à bande étroite.

(l'encadré page 68). Lorsqu'un atome se désexcite, il émet un grain de lumière ou photon. Le milieu actif amplifie de façon cohérente les photons émis spontanément par les atomes : un tel photon arrivant sur un atome excité provoque – « stimule » – la désexcitation de cet atome, qui émet un photon identique au photon incident. On obtient ainsi deux photons ayant la même direction, la même longueur d'onde et la même phase. Ceux-ci à leur tour pourront provoquer la désexcitation d'autres atomes excités, créant en cascade un faisceau de photons identiques.

Ce phénomène d'émission stimulée diffère du processus à l'œuvre dans les sources de lumière ordinaires. Dans ces dernières, les atomes se désexcitent spontanément et indépendamment les uns des autres en émettant chacun un photon de direction et de longueur d'onde arbitraires. La lumière totale émise est alors la superposition de chacune de ces impulsions individuelles aléatoires, c'est-à-dire incohérente.

Mais le milieu actif ne fait pas un laser à lui tout seul. Sans la cavité optique qui l'entoure, il n'est qu'un simple amplificateur de photons. Habituellement formée



de deux miroirs parallèles, la cavité laser qui contient ce milieu est essentielle, car elle confine la lumière et favorise l'amplification du faisceau.

La cavité : un élément essentiel

C'est aussi la cavité qui confère au faisceau laser ses principales caractéristiques : sa longueur d'onde précise et sa directivité. Comme dans un résonateur acoustique (une cloche, un tuyau d'orgue ou une corde vibrante, voir l'encadré page 70), les fréquences de résonance de la cavité optique sont des multiples d'une fréquence fondamentale inversement proportionnelle à la longueur de la cavité, c'est-à-dire à la distance entre les deux miroirs.

Le rôle du milieu actif est de fournir le gain nécessaire à l'excitation de ces résonances – ou modes vibratoires du champ lumineux – en amplifiant suffisamment l'émission de photons dont la longueur d'onde correspond aux fréquences de résonance de la cavité. Une seule ou plusieurs de ces résonances pourront donner lieu à l'oscillation laser. Si une seule

d'entre elles est excitée, l'émission laser – dite alors monochromatique – présentera une très grande pureté spectrale correspondant à la fréquence de cette résonance. Même si plusieurs résonances sont simultanément excitées, cette pureté spectrale restera meilleure que celle des sources thermiques. La propriété associée à cette pureté spectrale est la *cohérence temporelle* : la fréquence d'oscillation de l'onde est tellement pure que le faisceau peut interférer avec lui-même sur de très longues distances, c'est-à-dire produire une alternance de franges brillantes et sombres bien définies.

La direction du faisceau laser est quant à elle fixée par l'axe des miroirs. La propriété qui se traduit par cette directivité du faisceau est la *cohérence spatiale* du laser ; elle aussi dépend de résonances provoquées par la géométrie de la cavité, mais cette fois dans les plans perpendiculaires à l'axe de la cavité et non le long de cet axe (voir l'encadré page 70).

L'effet laser est un phénomène à seuil. Pour que l'émission laser s'établisse, le gain du milieu amplificateur doit être supérieur aux pertes dans la cavité. Ces pertes peuvent être liées à l'extraction du faisceau

2. COMPARAISON d'un laser classique (a) et d'un laser aléatoire (c). Dans les deux cas, une source extérieure (ici un laser, en vert) excite les atomes d'un milieu actif, les faisant passer d'un état d'énergie E_i à un état d'énergie E_s (via un état intermédiaire E_{int} , b1). En se désexcitant spontanément (b2) ou non (b3), un atome émet un photon, qui peut rencontrer un autre atome excité et provoquer sa désexcitation. Cet atome émet alors un photon identique au photon incident (b3), qui pourra à son tour stimuler l'émission d'autres photons. Pour optimiser ce processus d'amplification, il faut allonger au maximum le parcours des photons dans le milieu amplificateur. Dans un laser classique, deux miroirs jouent ce rôle en obligeant les photons à effectuer des allers-retours (a). Dans un laser aléatoire, le rôle est tenu par un milieu diffusant, ici des microbilles immergées dans le milieu actif (c). Diffusés par les microbilles, les photons restent plus longtemps dans le milieu actif, qui les amplifie avant qu'ils ne s'échappent (d, e). L'émission laser (en rouge) n'est alors pas directionnelle, mais dépend de la géométrie de l'échantillon.

LES MODES VIBRATOIRES D'UNE CAVITÉ

La cavité laser formée par les deux miroirs parallèles est l'analogue optique d'une cavité acoustique telle qu'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités. On sait que la mise en mouvement d'une telle corde se traduit par une superposition de modes de vibration. Qu'est-ce qu'un mode de vibration ? C'est une résonance naturelle de la corde. Si on excite celle-ci par une source monochromatique (de fréquence unique), la corde vibre à la fréquence de la source avec une amplitude qui dépend de la fréquence. Pour certaines valeurs de cette dernière, la réponse de la corde est particulièrement forte, avec une amplitude de vibration considérable par rapport à l'amplitude moyenne observée pour une fréquence quelconque.

La corde vibre préférentiellement à ces fréquences de résonance plutôt qu'à une fréquence quelconque. Il en est de même pour une cavité laser, où l'amplitude du champ lumineux joue l'équivalent de l'amplitude de vibration de la corde. Dans le cas de la corde, les fréquences de résonance sont des multiples d'une fréquence fondamentale qui est inversement proportionnelle à la longueur de la corde (a). Il en est de même pour les fréquences de résonance de la cavité laser, qui sont des multiples d'une fréquence fondamentale inversement proportionnelle à la longueur de

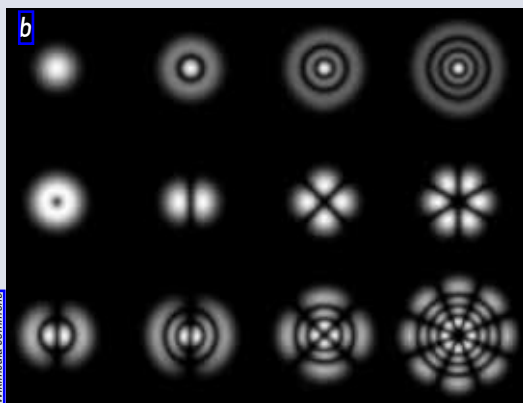
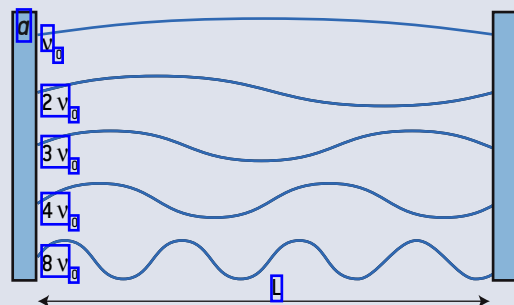
la cavité, soit à la distance entre les deux miroirs.

Cette fréquence fondamentale est aussi la différence des fréquences de deux résonances voisines. Plus la cavité est longue, plus cette différence est faible. Pour une cavité de longueur un mètre (laser à gaz), cette différence vaut 150 mégahertz, alors que pour une cavité de l'ordre de 100 micromètres (laser à semi-conducteur), elle est 10 000 fois plus élevée. Généralement, la différence des fréquences de deux résonances voisines est plus faible que la largeur du spectre de photons émis par le milieu amplificateur du laser. Plusieurs résonances peuvent ainsi être favorisées dans la cavité, ce qui conduit à un laser à plusieurs modes.

Ces résonances le long de la cavité sont nommées modes longitudinaux. Si l'analogie avec la corde vibrante permet de comprendre leur structure, elle ne peut décrire les variations transverses du champ, celles qui se produisent dans toute section perpendiculaire

à l'axe de la cavité. Liées à la section finie de la cavité, ces variations se traduisent par des modes transverses, caractérisés par leur profil spatial dans une telle section (b). Parmi ceux-ci, le premier (*en haut à gauche*) est celui dont les pertes par diffraction sur les bords des miroirs sont les plus faibles. Ce mode est en général caractérisé par un haut degré de corrélation de l'amplitude et de la phase des ondes dans une section transverse du faisceau. Désignée sous le nom de cohérence spatiale, cette propriété se traduit par la directivité du faisceau laser.

Le meilleur faisceau possible sera donc celui qui n'excitera qu'un unique mode longitudinal, et ce dans le premier mode transverse, ce qui lui assurera respectivement cohérence temporelle et cohérence spatiale. Soulignons que c'est la cavité qui confère au faisceau laser ses propriétés. Le rôle du milieu atomique n'est que de fournir le gain nécessaire à l'excitation des modes de cavité.



Comme les modes de vibration d'une corde de longueur L , les modes longitudinaux d'une onde lumineuse dans une cavité de longueur L sont des vibrations à des fréquences multiples d'une fréquence fondamentale ν_0 inversement proportionnelle à L (a). Les modes transverses d'une onde lumineuse dans une cavité (b) sont liés à la section finie de la cavité.

hors de la cavité (un des miroirs n'est pas parfaitement réfléchissant pour laisser sortir le faisceau laser), à la diffraction due à la taille finie des miroirs, à l'absorption ou à la diffusion sur des particules ou des obstacles présents dans la cavité. Cela se traduit par l'existence d'un seuil d'excitation à partir duquel l'émission laser se déclenche. Dans de nombreux lasers, le gain du milieu amplificateur est faible. Pour minimiser les pertes, on utilise des miroirs de sortie à fort pouvoir réfléchissant, de telle sorte qu'une très faible fraction du faisceau soit extraite de la cavité.

Ces considérations soulignent une préoccupation permanente des fabricants de lasers : pour améliorer les performances d'un laser, il faut la meilleure cavité possible en termes de minimisation des pertes. En particulier, toute impureté ou particule diffusante présente dans le milieu actif est nuisible au fonctionnement du laser.

La découverte du laser aléatoire

Si le rôle de la cavité dans un laser classique est si essentiel, comment un effet laser a-t-il pu être obtenu en l'absence de miroirs ? C'est pourtant bien ce qu'ont observé la physicienne Hui Cao et son groupe à l'Université Northwestern, à Chicago, en 1999, avec une poudre d'oxyde de zinc (voir la figure 3). D'autres équipes ont suivi avec divers systèmes actifs constitués de particules diffusantes.

Émise dès la fin des années 1960 par le physicien russe Vladilen Letokhov, l'idée d'un laser sans miroirs, fondée sur l'amplification de la lumière diffuse, est née dans le contexte des masers interstellaires. Des faisceaux micro-ondes intenses sont émis et amplifiés par les nuages de gaz qui entourent les étoiles en fin de vie. La diffusion possible des micro-ondes dans ces gaz, de même que celle des photons dans les poudres, allonge le chemin parcouru dans le milieu amplificateur, un peu comme le fait la cavité d'un laser classique. Ici, cependant, le milieu est complètement ouvert et la lumière finit par s'échapper librement par les bords.

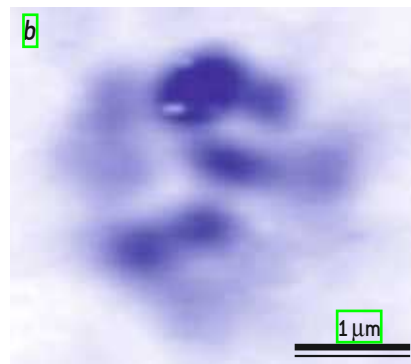
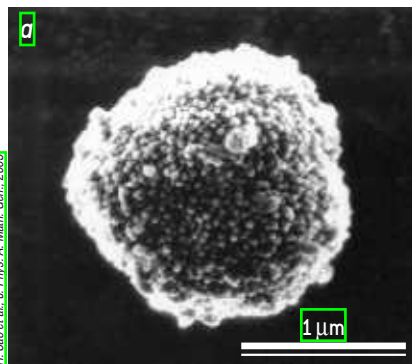
Par diffusion, les photons explorent tout le volume du milieu actif et la probabilité d'engendrer un nouveau photon par émission stimulée croît donc avec le volume. En revanche, les pertes sont proportionnelles à la surface qui entoure ce volume. Lorsque la taille du système augmente, le volume

croît plus vite que la surface. Il existe donc une taille critique au-delà de laquelle chaque photon parvient à en engendrer un autre avant de s'échapper du milieu. Cela déclenche une réaction en chaîne qui crée un nombre croissant de photons.

Les premières démonstrations expérimentales ont été réalisées dans des poudres de cristaux et dans des suspensions d'oxyde de titane (principal composant de la peinture blanche) ou dans une solution de colorant organique à fort gain. À chaque fois, la signature était la même : au-dessus d'un seuil d'excitation bien défini, on observait un rétrécissement spectral de l'émission lumineuse. En quelque sorte, le spectre d'émission du milieu actif se resserrait autour d'une fréquence, autrement dit d'une couleur particulière. Cependant, l'émission ne présentait pas les raies spectrales fines d'un laser conventionnel. L'effet observé semblait plutôt s'apparenter au phénomène d'amplification d'émission spontanée, observé par exemple lors de l'amorçage des lasers classiques, lorsque les résonances de la cavité n'ont pas encore été excitées : un photon spontanément émis par le milieu actif est amplifié par ce milieu, préférentiellement à la fréquence où le gain du milieu est maximal. Les observations expérimentales furent d'ailleurs qualifiées d'effet laser « avec rétroaction non résonante ». Et pour cause, en l'absence de cavité, les notions de résonance le long de l'axe ou perpendiculairement à celui-ci n'avaient *a priori* pas lieu d'être.

L'observation, en 1999, de raies laser étroites comparables à celles d'un laser classique dans des poudres d'oxyde de zinc excitées optiquement fut donc une surprise (voir la figure 3). Elle remettait en cause la compréhension acquise jusqu'alors : l'apparition de raies étroites signifiait que des résonances du système avaient été excitées. Mais de quelles résonances s'agissait-il en l'absence de cavité ? Les toutes premières interprétations s'orientèrent vers l'existence de résonances localisées, à l'intérieur du système désordonné. Pourquoi localisées ? Tout simplement parce qu'en étant localisées loin des bords, les résonances n'entraîneraient que de faibles fuites de lumière vers l'extérieur – suffisamment faibles pour que les résonances jouent un rôle similaire aux modes vibratoires d'une cavité classique à deux miroirs.

Comment, cependant, de telles résonances peuvent-elles apparaître dans ces systèmes diffusifs ouverts ? En fait, un tel



cas existe : il s'agit des systèmes diffusifs dans le régime de localisation d'Anderson. En 1958, l'Américain Philip Anderson a prédit qu'en présence de désordre spatial, la conduction électronique d'un métal pouvait s'annuler et le rendre isolant, ce qui lui a valu le prix Nobel en 1977.

Ce phénomène très général s'applique à tout type d'onde, en particulier la lumière : dans les systèmes très diffusants, la lumière est piégée dans une région finie de l'espace et ne se propage plus. Une telle région est caractérisée par sa taille, appelée longueur de localisation. Cette longueur diminue lorsque le système devient de plus en plus diffusant, par exemple lorsque l'on utilise des particules d'indice de réfraction de plus en plus élevé. Si la longueur de localisation est supérieure à la taille du système étudié, la lumière s'échappe par les bords du système avant de pouvoir être piégée par le désordre. Mais si la longueur de localisation est inférieure à la taille du système, la lumière ne peut plus s'échapper du système. Il existe alors, dans ce régime, des résonances similaires à celles d'une cavité à deux miroirs, mais de structures spatiales très différentes (voir la figure 8).

Des modes vibratoires sans cavité

La présence de telles résonances dans les systèmes diffusifs à gain pourrait expliquer l'apparition d'un spectre de raies étroites correspondant à l'excitation laser de ces modes. Un tel régime reste cependant difficile à atteindre en optique, car il exige des milieux très diffusants. L'analyse des échantillons utilisés dans les expériences de Hui Cao et dans d'autres expériences similaires a en outre montré que l'on se trouvait loin du régime de localisation d'Anderson. L'excitation de résonances localisées n'était donc pas à l'origine des raies laser observées. Face à cette énigme,

3. UN MICROLASER ALÉATOIRE constitué d'un agrégat d'environ 20 000 nanoparticules d'oxyde de zinc, observé en microscopie électronique (a). L'excitation optique des nanoparticules conduit à l'émission laser de l'agrégat dans l'ultraviolet (b).

BIBLIOGRAPHIE

Ad Lagendijk *et al.*, Fifty years of Anderson localization, *Physics Today*, vol. 62, pp. 24-29, 2009.

Hakan Türeci *et al.*, Strong interactions in multimode random lasers, *Science*, vol. 320, pp. 643-646, 2008.

Randal Polson et Valy Vardeny, Random lasing in human tissues, *Applied Physics Letters*, vol. 85, pp. 1289-1291, 2004.

Hui Cao, Lasing in random media, *Waves in Random Media*, vol. 13, pp. R1-R39, 2003.

Hui Cao *et al.*, Random laser action in semiconductor powder, *Physical Review Letters*, vol. 82, pp. 2278-2281, 1999.

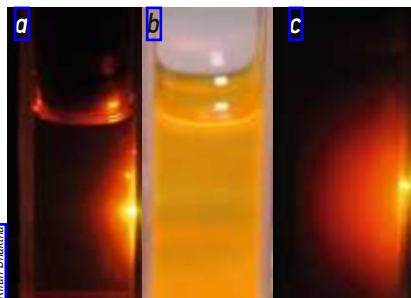
différentes hypothèses ont été avancées, comme l'existence de résonances accidentellement localisées, même loin du régime d'Anderson, ou encore l'amplification, le long de chemins de diffusion anormalement longs, de certains photons « chanceux ».

Aujourd'hui, l'origine de ces raies laser semble comprise pour une bonne part à la suite de travaux numériques et théoriques récents. On s'est d'abord aperçu que même loin du régime de localisation d'Anderson, les systèmes diffusifs ouverts, et donc très fuyants, possédaient des résonances. Malgré leur très mauvaise qualité liée à leurs fortes pertes vers l'extérieur, ces résonances peuvent être excitées en présence de gain : ici, l'histoire se répète, il suffit que le gain devienne supérieur aux pertes pour que l'on observe l'oscillation laser, qui se traduit par la présence de raies étroites dans le spectre d'émission. Cela évidemment au prix d'une excitation externe très intense. Cependant, les modes vibratoires excités sont très différents des modes bien connus des cavités ou des résonances localisées (voir la figure 8c).

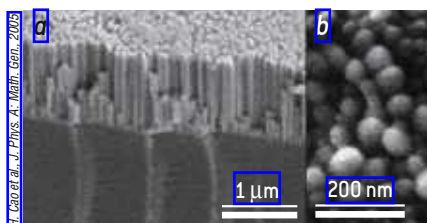
Une théorie englobant tous les lasers

Dans un laser traditionnel, il est admis que les modes laser sont simplement les modes de la cavité excités par le gain. Cette hypothèse est à la base de la compréhension théorique du laser jusqu'à aujourd'hui. Elle repose sur la condition que les pertes de la cavité sont faibles, ce qui est raisonnable dans de nombreux cas. Mais cette condition ne tient plus dans le cas des lasers aléatoires. Tout récemment, Douglas Stone, Hakan Türeci et leurs collaborateurs à l'Université de Yale ont proposé une théorie qui, contrairement à la théorie standard, ne s'appuie pas *a priori* sur les modes d'une cavité : au lieu de considérer les modes d'une cavité comme une des données du problème, ils ont supposé qu'il existait des modes vibratoires, mais inconnus, à déterminer de toutes pièces avec pour seules données les caractéristiques du système diffusant à gain.

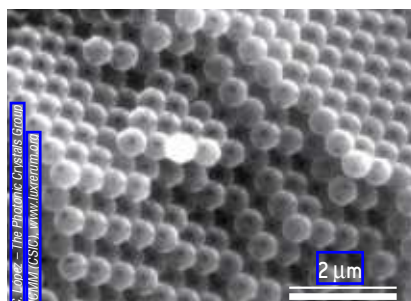
Cette approche leur a permis de proposer une nouvelle description, plus générale, des modes vibratoires laser, qui englobe le cas conventionnel des lasers à cavité, mais s'étend aussi aux nouvelles sources laser fortement ouvertes telles que les micro-disques (voir la figure 8a), les lasers distribués (où un réseau est gravé dans la région active pour forcer l'émission à une longueur



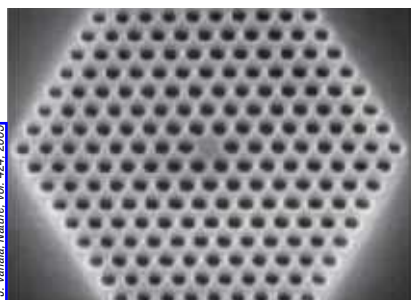
4. LASER ALÉATOIRE À COLORANT : le milieu aléatoire est une suspension de nanoparticules d'oxyde de titane dans un colorant [b]. Un faisceau laser vert excite le colorant qui réémet dans le rouge [c]. Sans les nanoparticules [a], il n'y a pas d'émission laser.



5. LASERS ALÉATOIRES À SEMI-CONDUCTEURS : des nanopiliers d'oxyde de zinc sur un substrat de saphir [a] ou une poudre de nanocristaux d'oxyde de zinc [b] servent à la fois de milieu actif grâce à leurs propriétés électriques, et de milieu diffusant par leur géométrie.



6. LASER ALÉATOIRE dans une structure d'opale : un réseau interconnecté de sphères d'air entourées de coquilles de silicium joue le rôle du milieu diffusant. Ce réseau est infiltré par un colorant – le milieu actif.



7. LASER À CRISTAL PHOTONIQUE : une membrane semi-conductrice percée périodiquement est excitée par le dessus. L'effet laser est attendu dans le plan de la membrane. Ce laser devient un laser aléatoire quand on introduit un désordre sur la position des trous ou sur leur forme.

d'onde particulière, déterminée par le pas du réseau) ou les lasers aléatoires ...

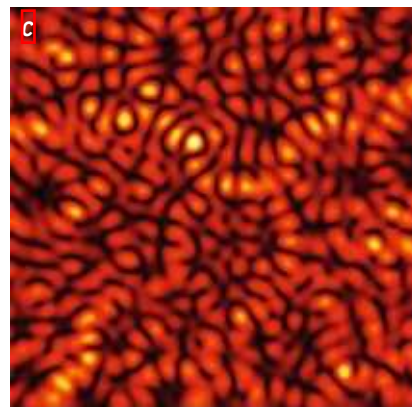
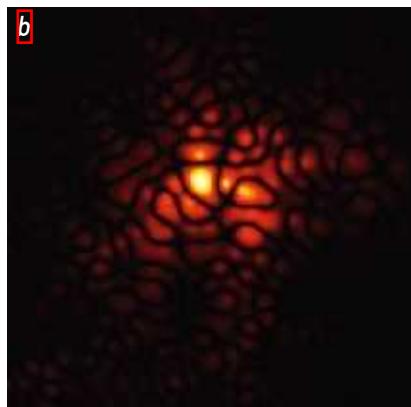
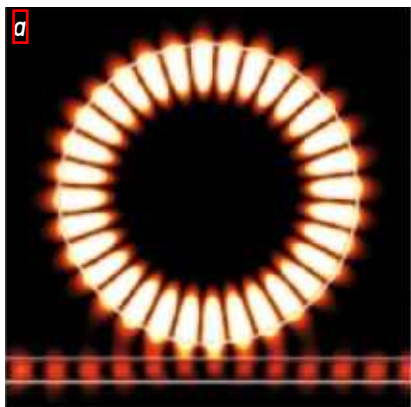
Qu'en est-il des propriétés de l'émission laser en l'absence de cavité ? Un laser aléatoire conserve une bonne cohérence temporelle, mais perd sa directivité. En effet, l'émission ne se fait plus selon une direction bien définie, mais dans toutes les directions de manière aléatoire. Cette perte de directivité provient de la structure complexe des modes laser et de leur couplage avec l'extérieur (voir la figure 1). En revanche, la cohérence temporelle est conservée : si un seul mode vibratoire est excité, la lumière sera à peu près aussi monochromatique que celle d'un laser classique.

En pratique, un laser aléatoire a énormément de modes, car leur nombre augmente avec le volume (contrairement à un laser conventionnel, dont le nombre de modes est plus faible, car il augmente comme la longueur de la cavité). Il est donc difficile de n'exciter qu'un seul mode, sauf dans des structures de taille micrométrique. Le laser aléatoire présente ainsi une cohérence temporelle moyenne, à l'instar des lasers traditionnels multimodes.

Une propriété originale du laser aléatoire est que l'émission dépend de la localisation spatiale de l'excitation externe. Dans la majorité des systèmes étudiés jusqu'à maintenant, l'excitation est optique : on illumine l'échantillon au moyen d'un faisceau laser externe suffisamment intense. Il suffit de déplacer légèrement ce faisceau sur l'échantillon pour que d'autres résonances soient excitées et que le spectre de l'émission laser change en conséquence.

Une autre propriété distingue la lumière laser de celle émise par une source classique : la statistique des photons, qui mesure leur tendance à être émis plus ou moins régulièrement dans le temps. Les photons d'une source classique ont tendance à être émis groupés en « paquets », alors que l'émission des photons laser est plus régulière. En conséquence, l'intensité lumineuse d'une source classique est beaucoup plus fluctuante que celle d'un laser. Pour en avoir le cœur net, plusieurs groupes ont mesuré la statistique des photons émis par un laser aléatoire et ont ainsi vérifié que le laser aléatoire se comporte comme un laser classique.

Même si les lasers aléatoires ont un avantage sur les lasers conventionnels, car ils sont beaucoup plus faciles à réaliser et donc moins chers, il est encore trop tôt pour identifier le rôle qu'ils vont jouer dans notre vie de tous les jours. Cependant, on a vu



dans quelle mesure ils se distinguent des lasers classiques et c'est là qu'il faut aller chercher les applications futures. La cohérence temporelle de l'émission d'un laser conventionnel dépend des caractéristiques de la cavité optique. Cela peut représenter un sérieux désavantage dans certaines applications, lorsque par exemple une grande précision spectrale est requise. En revanche, avec un laser aléatoire, la longueur d'onde d'émission n'est plus sensible à l'alignement d'une cavité, et sa sensibilité aux effets thermiques ou aux vibrations mécaniques peut être fortement réduite.

D'autre part, la perte de cohérence spatiale dans les lasers aléatoires peut s'avérer très utile. Parce qu'ils émettent et sont donc visibles dans toutes les directions, les lasers aléatoires pourraient être très efficaces dans les dispositifs d'affichage. Cette propriété leur a d'ailleurs valu la dénomination de peinture laser. Évidemment, la longueur d'onde émise par un laser aléatoire est imprévisible. Elle dépend de façon complexe de la configuration du désordre dans la zone d'excitation. Cela peut cependant devenir un atout dans les dispositifs de codage ou d'identification. Ainsi, la Société *Spectra Systems Corp.* conçoit et distribue un système de codes-barres photoniques multicolores spécialement conçu pour le tri en environnement difficile.

L'utilisation des lasers aléatoires est aussi proposée pour le dépistage de certains cancers. Zeev Vally Vardeny et son équipe, à l'Université de l'Utah, ont récemment montré que l'injection d'un colorant dans des tissus biologiques, en particulier humains, donne lieu à un effet laser aléatoire plus intense dans une tumeur que dans un tissu sain, à cause de la plus grande hétérogénéité de la tumeur.

Les lasers aléatoires pourraient aussi présenter un intérêt pour la réalisation

de lasers dans les domaines ultraviolet et X, pour lesquels il n'existe pas de bons miroirs, comme dans le domaine visible. Cette difficulté serait levée si l'on parvenait à construire des lasers aléatoires – qui ne nécessitent pas de miroirs – dans ces domaines. Ainsi, les poudres d'oxyde de zinc sont particulièrement étudiées, car elles sont très efficaces dans l'ultraviolet (voir la figure 3).

Enfin, nous l'avons évoqué, l'étude fondamentale de l'effet laser aléatoire trouve un intérêt particulier dans le domaine des cristaux photoniques (voir la figure 7). Le cristal parfait n'existe pas et le désordre est inévitable. D'où l'intérêt croissant des scientifiques pour comprendre le rôle du désordre et, si possible, plutôt que de repousser à tout prix les limites technologiques pour l'éviter, en faire plutôt son allié.

Principal obstacle : l'excitation du milieu actif

À l'heure actuelle, ces applications ne sont que potentielles, car plusieurs obstacles restent à franchir. Le plus sérieux est celui de l'excitation du milieu actif. Tout d'abord, les pertes par les fuites vers l'extérieur étant beaucoup plus importantes que dans une cavité traditionnelle, les seuils d'excitation à atteindre pour obtenir un effet laser peuvent être élevés.

Par ailleurs, le faisceau d'excitation est lui-même diffusé par le milieu désordonné et pénètre donc difficilement dans l'échantillon ; l'excitation du milieu en est d'autant moins efficace et nécessite donc des intensités d'excitation plus élevées. Le futur du laser aléatoire sera probablement de le confiner au moins partiellement sous forme de couche mince ou de guide d'onde.

8. TROIS MODES LASER illustrés pour trois systèmes bidimensionnels différents (simulations numériques). L'un est une cavité microdisque (a), où un microdisque diélectrique sert à la fois de cavité et de milieu amplificateur ; le faisceau est piégé dans le microdisque et, pour en récupérer une partie, on appose une fibre optique le long du disque, qui sert de guide à la lumière (en bas). Les deux autres systèmes sont des milieux remplis de particules (non représentées) très diffusantes (b), ou peu diffusantes (c). Dans le premier cas (a), le mode se caractérise par ses motifs réguliers. Dans le deuxième (b), le mode est spatialement localisé par le désordre [seuil bas]. Dans le troisième (c), le mode laser est étendu et les fuites aux bords sont importantes [seuil élevé].

Nous effectuons actuellement des recherches dans ce sens en imposant au système une géométrie soit bidimensionnelle – membrane semi-conductrice de 150 nanomètres suspendue dans l'air –, soit unidimensionnelle – colorant et nanoparticules dans des tuyaux micrométriques. L'excitation électrique à l'aide d'électrodes, comme dans les lasers à semi-conducteurs, est aussi une alternative qui stimule plusieurs études dans cette direction.

Un autre obstacle réside dans la difficulté à obtenir des lasers aléatoires plus performants. Dans l'espoir d'étendre les applications possibles du laser aléatoire, plusieurs groupes tentent ainsi d'améliorer sa pureté spectrale.

Le laser aléatoire est encore jeune et sa compréhension reste incomplète, malgré les nombreux progrès de ces dix dernières années. On peut néanmoins s'attendre à l'émergence de certaines applications dans les années à venir. Quant à la question : est-ce un vrai laser ? La réponse est oui, même si certaines de ses propriétés d'émission le distinguent d'un laser classique. ■

Les esclaves des tombes néolithiques

A. Testart, Ch. Jeunesse, L. Baray et B. Boulestin

Les Européens d'il y a quelque 6 000 ans inhumait souvent plusieurs personnes en même temps. L'analyse de leurs tombes suggère qu'une ou plusieurs personnes dépendantes d'un personnage principal, sans doute ses esclaves, l'accompagnaient dans la mort.

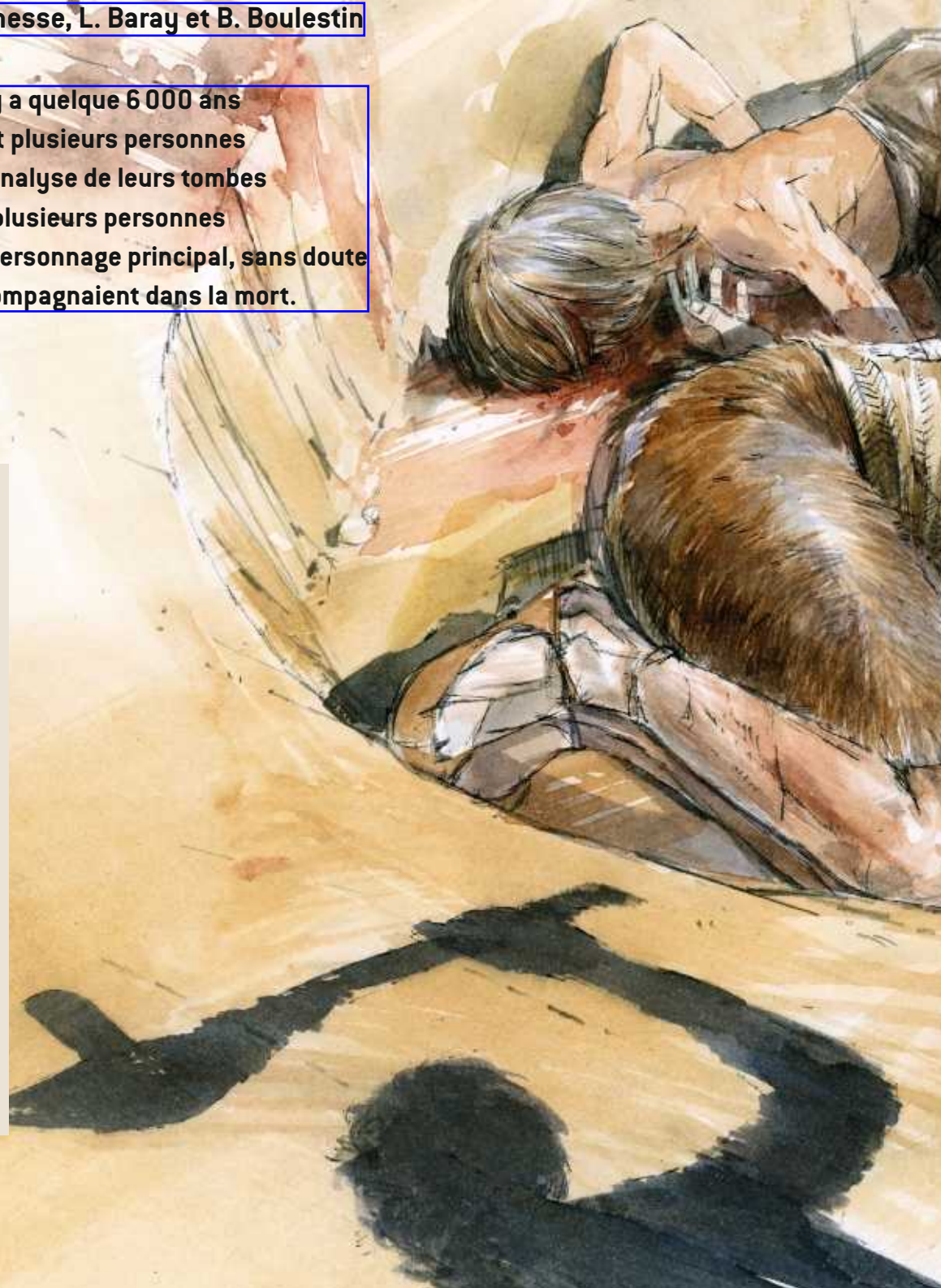
L'ESSENTIEL

✓ Dans une large partie de l'Europe, on commence il y a quelque 6 000 ans à inhumier dans des tombes en fosses circulaires.

✓ Certaines de ces tombes contiennent plusieurs défunts enterrés simultanément.

✓ Tandis qu'un de ces défunts est enterré dans la position mortuaire alors conventionnelle, les autres semblent avoir été jetés là dans des positions aberrantes.

✓ La répétition de cette situation suggèrent que ces défunts secondaires accompagnaient dans la mort un défunt principal.





1. CET ANCIEN HABITANT DE LA RÉGION DE DIDENHEIM,
en Alsace, n'est pas mort seul (voir la figure 4).
Nous ignorons pourquoi, mais il s'est fait accompagner
dans la mort par trois personnes, dont un adulte
et deux enfants. Sur cette vue d'artiste, on le voit
accompagné d'un enfant, tandis qu'une autre
personne est mise à mort (ombres).



2. LA DISPOSITION DES CORPS dans cette tombe trouvée dans les années 1980 à Saint-Paul-Trois-Châteaux, dans la Drôme, révèle une asymétrie entre une défunte principale disposée en décubitus latéral et accompagnée d'un vase (à droite) et deux autres défentes, dont les corps semblent avoir été jetés sans ménagement contre la paroi.

LES AUTEURS



Alain TESTART, anthropologue, directeur de recherche au CNRS, travaille au Laboratoire d'anthropologie sociale du Collège de France.
Christian JEUNESSE, archéologue, est professeur d'archéologie à l'Université de Strasbourg.
Luc BARAY, archéologue, chargé de recherche au CNRS, travaille à l'Université de Bourgogne.
Bruno BOULESTIN, archéologue, travaille au Laboratoire d'anthropologie des populations du passé de l'Université Bordeaux 1.

Il y a quelque 6000 ans, une nouvelle manière de traiter les morts apparaît en Europe. Tout au long d'un vaste croissant reliant le Midi de la France à la Pologne, les paysans du Néolithique récent – entre 4500 et 3500 avant notre ère – se mettent à enterrer des défunts dans des fosses circulaires, que l'on interprète souvent comme des silos réemployés. Quand il y est isolé, un mort y est le plus souvent dans la position mortuaire conventionnelle au Néolithique, qui rappelle la position fœtale. Toutefois, dans nombre de tombes, plusieurs corps ont été jetés sans respect à côté d'un défunt enterré de façon conventionnelle. Intrigués par ce phénomène, les archéologues en débattent intensément. Nous examinerons soigneusement plusieurs tombes multiples typiques afin de les caractériser, puis nous en défendrons l'interprétation qui nous convainc le mieux : l'existence au Néolithique récent d'une forme d'esclavage qui se poursuivait jusque dans la mort...

Le mode de vie néolithique, c'est-à-dire pour simplifier l'agriculture, la céramique et la vie sédentaire en village, se répand en Europe occidentale au cours du VI^e millénaire avant notre ère. Entre le bassin de la Seine et le littoral méditerranéen, on assiste vers 4500 à la formation d'une culture appelée le Chasséen. Autant qu'on puisse en juger, cette époque est marquée par de profonds bouleversements à

la fois économiques et sociaux. Un système de subsistance plus efficient rend possible la colonisation de régions restées en marge lors de la première vague de néolithisation, ce qui enclenche une augmentation de la population visible dans la multiplication spectaculaire des habitats. En même temps, émerge une nouvelle organisation sociale marquée par une plus grande différenciation sociale.

Ce mouvement se traduit par de nouveaux usages funéraires. D'une part, des coffres en pierre recouverts de tertres destinés à accueillir les morts de l'élite sont construits dans le Sud de l'aire concernée. D'autre part, d'insolites sépultures y apparaissent en nombre, qui ont deux traits principaux : elles sont dispersées au sein de l'habitat et leurs fosses sont circulaires (ce qui fait qu'il pourrait s'agir de silos réemployés). La plupart contiennent un seul individu en position fœtale, c'est-à-dire couché sur le côté avec les membres inférieurs et supérieurs fléchis. Cette position, que les archéologues nomment le décubitus latéral, constituait une sorte de norme funéraire puisqu'elle fut la plus fréquemment utilisée par la plupart des cultures néolithiques. Au sein de ce grand ensemble de sépultures à fosses circulaires, un petit sous-ensemble de tombes retient notre attention, car il s'agit de tombes multiples.

On nomme ainsi des tombes contenant plusieurs corps déposés simultanément. Dans tous les cas dont nous parlerons, cette simultanéité est bien établie par des fouilles minutieuses mettant en évidence les phénomènes significatifs à cet égard, tels l'absence de séparation notable entre squelettes ou le maintien des connexions labiles (articulations, connexions entre vertèbres, etc.)

Sauf exceptions notables, les archéologues ont interprété la présence récurrente de corps déposés sans ménagement comme des cas de relégations d'individus jugés indignes de bénéficier du traitement funéraire normal, ou alors comme la dernière étape, non significative, d'une série de gestes à la signification inconnue, et que, faute de traces, rien ne permettrait jamais de reconstituer.

Il aura fallu attendre les fouilles menées dans les années 1980 dans la vallée du Rhône sous l'impulsion d'Alain Beeching, du Centre d'archéologie préhistorique du Rhône aux Alpes à Valence, pour que s'amorce un changement de perspective. Les deux sites chasséens de Saint-Paul-

Irois-Châteaux « Les Moulins » et de Montélimar « Le Gournier » ont livré nombre de fosses circulaires dont certaines contenaient des restes humains, avec, dans les deux cas, des sépultures multiples.

Pour Les Moulins, on retiendra la fosse 69, une structure circulaire qui a livré les restes de trois adultes féminins en connexion et d'un enfant représenté par un os isolé. Les défuntes ont été déposées simultanément et l'on distingue clairement un individu central: le seul en décubitus latéral, le seul accompagné d'un vase et le seul bien visible depuis le bord de la fosse (voir la figure). En revanche, les deux autres sujets de la fosse 69 étaient comme plaqués contre la paroi dans des postures désordonnées, leurs deux corps se chevauchant partiellement.

Cette franche opposition entre le centre et la périphérie de la tombe a été soulignée par A. Beeching, qui évoque un « inhumé en position centrale » accompagné de « corps-rejets ».

Pour sa part, le site de Montélimar, Le Gournier, a livré 19 sépultures simples et deux sépultures multiples en fosse circulaire. Malheureusement perturbée par le creusement d'une tranchée, une première sépulture montrait elle aussi un individu en position centrale. Dans la seconde, un homme en position repliée, déposé le premier, était accompagné de trois enfants.

De façon générale, les tombes multiples du Chasséen de la vallée du Rhône comprennent entre trois et neuf individus. Dans tous les cas décrits, une chose frappe: une asymétrie règne entre un individu ayant un rôle central et ceux qui l'accompagnent.

Des dépôts humains comparables avaient depuis longtemps été identifiés dans nombre de cultures du Néolithique récent centre-européen, mais sans susciter grand intérêt. Un colloque tenu à Sens au printemps 2010 a été l'occasion de confronter des données venues d'une demi-douzaine de pays. Il en résulte que loin d'être cantonnée au Sud de la France, la répartition des sépultures en fosses circulaires concerne un large croissant reliant le Languedoc à la Slovaquie. Deux raisons majeures incitent en outre à penser que ce mode de traitement des défunts correspond à un phénomène unitaire: l'ensemble des vestiges est regroupé dans l'horizon allant de 4500 à 3500 avant notre ère; les régions concernées semblent toutes avoir été touchées par un mouvement de diffusion culturelle allant de l'Ouest vers l'Est.

La progression vers l'Est d'une nouvelle culture funéraire pendant le Néolithique récent a manifestement commencé par la culture de Michelsberg. Née dans le Sud du bassin Parisien d'un processus de métissage entre le Chasséen en expansion et le substrat local, cette culture a ensuite occupé la plus grande partie du bassin du Rhin. Contrairement au Chasséen, qui montre une certaine variabilité dans le domaine des pratiques funéraires, les tombes en fosses circulaires y occupent une position hégémonique. Poursuivant vers l'Est et s'infléchissant vers le Sud, le courant qui a porté sa diffusion est allé influencer d'autres cultures, telles celle de Münchshöfen en Bavière et celle de Munzingen dans le Sud de la plaine du Rhin supérieur. Toutes ont livré nombre de tombes multiples en fosses circulaires. La plus riche, attribuable à la culture de Michelsberg, contenait des restes humains provenant d'au moins 18 individus...

Diffusion Ouest-Est

Avec l'habitat fouillé récemment à Didenheim dans le Haut-Rhin, sous la direction de Muriel Zehner travaillant pour l'opérateur archéologique Antea archéologie, la culture de Munzingen a fourni un site intéressant pour la question qui nous occupe ici. Trois fosses circulaires datées du premier quart du IV^e millénaire avant notre ère comportaient, suivant le modèle défini dans les sites chasséens de la vallée du Rhône, un individu central en décubitus latéral et un nombre variable d'individus déposés sans règles apparentes. La plus

BIBLIOGRAPHIE

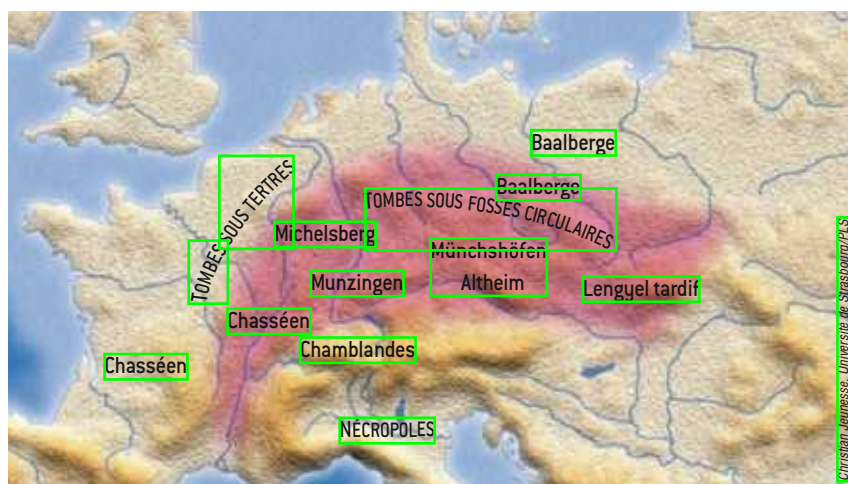
B. Boulestin, **Pourquoi mourir ensemble ? À propos des tombes multiples dans le Néolithique français**, *Bulletin de la Société préhistorique française*, vol. 105, n° 1, pp. 103-130, 2008.

L. Baray et B. Boulestin, **Morts anormales et sépultures bizarres**, *Actes de la II^e table ronde interdisciplinaire*, Sens, avril 2006.

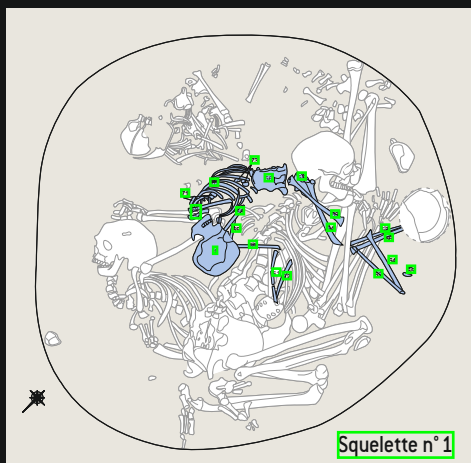
A. Testart, **La servitude volontaire**, (deux volumes : Les morts d'accompagnement, L'origine de l'État), Errance, 2004.

A. Beeching, **Organisation spatiale et symbolique du rituel funéraire chasséen en moyenne vallée du Rhône : première approche**, *Les pratiques funéraires néolithiques avant 3500 av. J.-C. en France et dans les régions limitrophes*, Mémoires XXXIII de la Société préhistorique française, pp. 231-239, 2003.

Ch. Jeunesse, **Pour une origine occidentale de la culture de Michelsberg ?**, *Die Michelsberger Kultur und ihre Randgebiete – Probleme der Entstehung, Chronologie und des Siedlungswesens*, Actes du colloque de Hemmenhofen de février 1997, pp. 29-45, 1998.

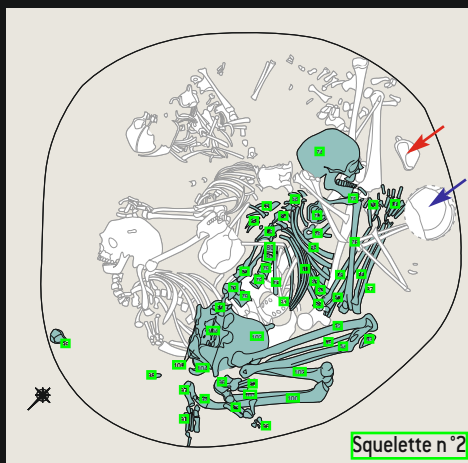


3. LA ZONE DES TOMBES EN FOSSES CIRCULAIRES dessine un vaste croissant allant du Languedoc à la Pologne et englobant plusieurs cultures. Elle est encadrée par deux zones où dominent l'inhumation sous tertres (au Nord-Ouest) et les nécropoles à tombes plates (au Sud).

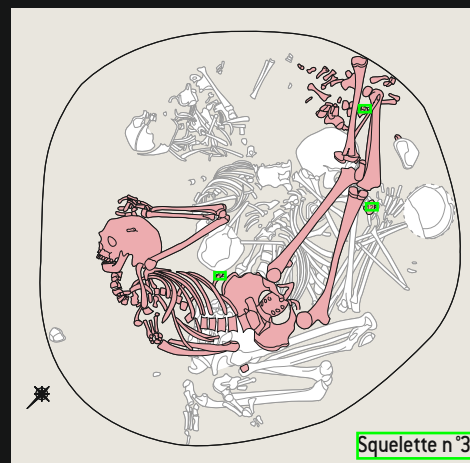


Squelette n°1

Christian Jeunesse, Université de Strasbourg/PLS



Squelette n°2



Squelette n°3

UNE DÉCOUVERTE ÉNIGMATIQUE EN ALSACE

Les corps jetés sans soins dans la tombe d'un défunt principal ne représentent pas les seules bizarreries funéraires néolithiques. Il existe aussi nombre de défunts isolés eux aussi inhumés sans soins. Comme les « accompagnants » des tombes multiples, ces individus semblent avoir été jetés au fond des fosses (ou creusement) dans des positions aberrantes. Comment interpréter le phénomène ?

L'explication la plus économe fait état d'accompagnants déposés dans des « fosses satellites » dépendant d'une sépulture principale. Une autre interprétation est qu'il s'agirait de défunts subissant une forme de relégation. Ce rejet social se traduirait dans le domaine funéraire par une gradation du rituel impliquant des gestes particuliers (ou par une absence de gestes) réservés à une catégorie de la po-

pulation à laquelle la position conventionnelle est refusée. Accepter cette possibilité revient à admettre que la catégorie sociale exclue du traitement conventionnel jouait un rôle central dans le rituel de l'accompagnement. Ces deux hypothèses ne sont pas antagonistes et il est probable que d'autres encore sont envisageables.

De fait, en 2008, une découverte réalisée sur le site de Colmar « Aérodrome » (Haut-Rhin) nous incite à envisager la pratique de dépôts humains hors du cadre funéraire. Ce site a livré un individu dans la position aberrante suivante : jeté sur le ventre, il avait la jambe gauche tendue suivant un angle de 90° avec le tronc et la jambe droite fléchie, mais la cuisse parallèle au tronc (voir ci-dessous). Au même niveau que le corps et en contact direct avec lui se trouvent deux « colliers »

de perles en cuivre relevant d'un type bien attesté sur le plateau suisse dans le deuxième tiers du IV^e millénaire avant notre ère ; au nombre de 56, ces perles représentent environ 400 grammes. Il va sans dire qu'il s'agit là d'objets exceptionnels, importés et utilisés comme marqueurs de prestige.

L'improbable association entre ces objets alors très valorisés et ce corps déposé là dans une position aberrante rend un dépôt funéraire peu vraisemblable : tous les mobiliers funéraires du corpus du Néolithique récent du Sud de la plaine du Rhin supérieur accompagnent en effet sans exception aucune des individus dans la position fléchie conventionnelle. Il s'agit en règle générale d'une ou de deux céramiques rituellement brisées avant dépôt, et, plus rarement, de gobelets en bois de cerf ou d'outillage poli.

L'hypothèse d'un « accompagnant » déposé dans une fosse satellite dépendant d'une inhumation principale ne rend pas compte, selon nous, de la présence des objets en cuivre et nous paraît pouvoir être écartée. Enfin, il semble que l'on puisse repousser l'éventualité d'une simple sépulture de relégation : si l'absence de gestes funéraires pour les individus inhumés en position inorganisée peut aller dans le sens de la relégation sociale, rien ne nous semble justifier le dépôt à leurs côtés d'objets socialement valorisés.

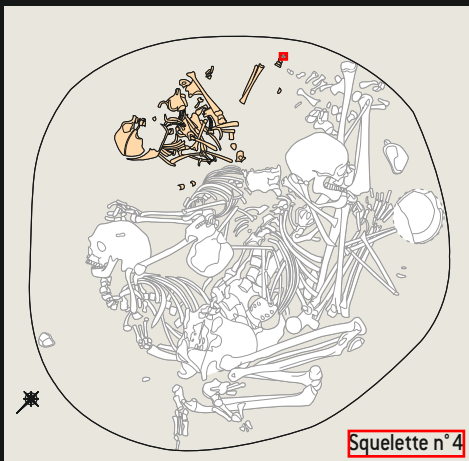
D'autres motivations peuvent avoir présidé à ce dépôt, notamment celles justifiant l'enfouissement d'objets valorisés ou de richesses : on peut évoquer ici l'offrande faite à des « puissances surnaturelles » et celle renvoyant à un aspect secondaire de la cérémonie du potlatch durant laquelle la destruction de certains biens intervient dans le cadre de la compétition sociale entre élites, telle qu'elle a été décrite par l'ethnologue Marcel Mauss (1872-1950). En suivant cette dernière idée, la destruction volontaire de biens s'exprimerait dans le cas de Colmar non seulement par le dépôt des perles en cuivre, mais aussi par celui d'un individu.

Il est évidemment impossible de dépasser le stade de la simple proposition, mais il nous semble que, dans une société qui pratique l'accompagnement funéraire comme cela est le cas pour ces sociétés du Néolithique récent/Chalcolithique ancien, la possibilité d'une mise à mort ritualisée d'individus hors du contexte funéraire et de l'accompagnement n'a, en théorie, rien d'irrecevable. En témoignent les sociétés de la Côte Nord-Ouest de l'Amérique du Nord, où l'accompagnement est attesté et où la mise à mort ostentatoire d'esclaves, considérés comme éléments de richesse, est une des destructions rituelles pratiquée pendant le potlatch.

Philippe Lefranc
INRAP, Grand-Est Sud



Cet individu découvert à Colmar, inhumé dans une position aberrante, était enterré avec deux objets prestigieux. Pourquoi ?



spectaculaire contenait les restes de quatre individus (voir la figure 4).

Cas moins clair, un homme retrouvé non loin de Sierentz, près de Mulhouse, a été couché en décubitus latéral sur trois enfants qui l'accompagnaient très probablement, car ils ont été jetés sans ménagement (voir la figure 6). Toutefois, on ne peut exclure qu'il s'agisse d'une tombe regroupant des membres d'une même famille. L'ethnographie nous a en effet révélé des cas d'élimination d'enfants dont le dernier parent nourricier a disparu.

Tous ces cas et ceux trouvés dans tout le croissant correspondant à la diffusion Ouest-Est déjà évoquée participent d'un même modèle que l'on peut résumer ainsi :

- dépôts des corps en fosses circulaires ;
- dépôts simultanés de plusieurs corps ;
- un défunt est privilégié : seul, en décubitus latéral, il peut être doté de mobilier.

L'ethnographie à la rescousse

Comment comprendre ces dépôts en fosses circulaires ? Tout d'abord, la récurrence du phénomène révèle une pratique unitaire et cohérente qui s'étend de la Méditerranée occidentale à l'Est de l'Europe centrale. Cela élimine des faits anecdotiques et démontre qu'il s'agit d'un rite funéraire régulier dans toute l'aire géographique concernée. La présence de plusieurs corps dans ces fosses, dont on peut démontrer qu'ils y ont été déposés en même temps ou dans un laps de temps court, et ce peu après le décès, indique par ailleurs que les gens sont morts simultanément ou dans un bref intervalle de temps.

Dans un travail récent, l'un d'entre nous (B. Boulestin) a montré qu'à partir de trois, la présence de plusieurs défunts dans une tombe ne peut relever du hasard, mais que leurs morts sont nécessairement liées. Par ailleurs, que ce lien ne peut être que de deux ordres : soit les décès ont une cause commune, soit c'est l'un d'entre eux qui va entraîner les autres. Le premier cas correspond aux crises de mortalité, qui peuvent être dues à des conflits armés, des famines, des épidémies, voire des accidents collectifs ou des catastrophes naturelles. Le second cas se produit quand décède un personnage important, événement entraînant l'exécution de certains de ses dépendants, qui l'accompagnent dans la mort et dans la tombe. C'est la coutume des « morts d'accompagnement », coutume dont l'un d'entre nous (A. Testart) a montré qu'elle était très répandue chez les peuples d'autrefois, sur tous les continents.

En archéologie, c'est-à-dire devant une tombe ancienne, la distinction entre ces deux possibilités repose principalement sur la mise en évidence d'une asymétrie entre les défunts, asymétrie qui peut se repérer à trois niveaux : celui de l'organisation spatiale de la sépulture, celui des postures corporelles et celui du mobilier funéraire. Si elle existe, elle traduit l'existence d'une hiérarchie entre les défunts ; cette hiérarchie ne peut que refléter celle qui existait entre les mêmes individus de leur vivant et s'interprète alors parfaitement comme de l'accompagnement. *A contrario*, il n'y a pas de raison qu'il existe une asymétrie entre des gens inhumés à l'occasion d'une simple crise de mortalité. Dans les cas dont nous traitons ici, le caractère systématiquement

4. DANS CETTE TOMBE de la culture de Munzingen, quatre individus étaient enterrés ensemble, mais l'un d'eux (*squelette n° 2*), un adulte accompagné d'un petit gobelet en bois de cerf (*flèche rouge*) et d'un grand fragment de récipient en céramique (*flèche bleue*) jouait manifestement un rôle central. Sous lui, un autre adulte (*squelette n° 3*) gisait dans une position désordonnée, tandis qu'un enfant (*squelette n° 1*) avait été jeté sur les deux adultes dans une position aberrante. À côté de cet amoncellement gisaient les restes déstructurés d'un second enfant (*squelette n° 4*) dont le corps était déjà décomposé au moment de son dépôt dans la sépulture.



5. EN BASSE MÉSOPOTAMIE, quelque 26 siècles avant notre ère, les rois à la tête des premiers États se faisaient accompagner de nombreuses personnes dans la mort. L'équipe de l'archéologue Leonard Woolley, qui a fouillé la tombe royale de la reine Puabi à Our, dans les années 1920, avait fait représenter une scène (*ci-dessus*) proche de celle qui précéda de peu l'empoisonnement des cinq soldats et 13 servantes qui accompagnèrent la reine dans la mort.



Ammaniana Latroni/INRAP Grand-Est

6. CET HOMME TROUVÉ LORS DE TRAVAUX sur le site de Sierentz (Haut-Rhin) a été couché en décubitus latéral au-dessus des corps de trois enfants. Une hache en pierre polie et des fragments de céramique ont aussi été trouvés dans sa tombe.

DES ESCLAVES
que l'on tuait pour suivre
leur maître, coutume qui
était assez répandue.

privilegié d'un corps par rapport aux autres, que nous avons souligné, atteste sans aucun doute de la pratique de l'accompagnement.

L'accompagnement semble donc l'explication la plus susceptible de rendre compte de toutes les données relatives aux sépultures multiples des cultures du Chasséen, de Michelsberg, de Münchshöfen et de Munzingen. Les corps uniques en fosses peuvent y être interprétés comme des sépultures simples régulières. Les corps multiples en fosses le sont en tant que rite funéraire régulier pour le seul personnage qui se trouve en position fléchie latérale, tous les autres ayant été tués pour l'accompagner. On notera que dans toutes ces cultures, le mobilier funéraire est particulièrement pauvre : tout au plus un peu de céramique, un outil, mais pas d'arme, ni d'objets précieux (ou de parures précieuses), ni rien qui puisse s'interpréter comme signe de richesse. C'est comme si le principal bien que l'on pouvait emporter dans l'autre monde était ces hommes ou ces femmes qui suivaient le défunt dans la tombe.

De sa revue systématique des données ethnographiques et historiographiques sur la pratique de l'accompagnement, A. Testart a conclu que les morts d'accompagnement étaient toujours des dépendants. C'étaient :

- soit des épouses qui accompagnent leurs défunts maris, ainsi qu'il est connu en Inde sous le nom de sati ;
- soit des serviteurs royaux qui accompagnent leur roi, ainsi qu'il en fut massivement en Chine dans la haute Antiquité (période Shang et Zhou) et probablement dans les tombes dites « royales » d'Our en Mésopotamie (voir la figure 5) ;
- soit des sujets d'un royaume théocratique

comme celui des Natchez, population amérindienne de Louisiane où l'on se suicidait à la mort du roi-soleil assimilé à un dieu ;

- soit des compagnons de guerre qui avaient fait vœu de ne pas survivre à la mort de leur chef s'il venait à mourir au combat, selon une coutume rapportée par Tacite pour les anciens Germains ;
- soit encore des esclaves que l'on tuait pour suivre leur maître, coutume très documentée en ce qui concerne les Amérindiens de la côte Nord-Ouest ou l'Afrique noire en dehors des grands royaumes.

Concernant les cultures du Chasséen, Michelsberg, Münchshöfen et Munzingen, la seule coutume du sati est exclue puisque le défunt principal pour lequel on peut penser que les autres ont été tués se trouve au moins dans certains cas être une femme, (site des Moulins). Les sépultures dont nous avons parlé n'ont aucunement l'allure de tombes royales, elles n'ont pas de luxe évident et sont trop nombreuses. L'hypothèse des compagnons de guerre paraît exclue par la présence d'enfants, mais aussi par l'absence de coups visibles sur les squelettes, d'armes et, de manière générale, de toute référence belliqueuse. Reste, et c'est la seule possible, l'hypothèse de l'esclavage, un esclavage dont nous croyons trouver les traces visibles dans ces sépultures du Néolithique récent.

Peut-être cette conclusion surprendra-t-elle ceux qui associent trop l'esclavage à la traite négrière ou à l'esclavage antique à Rome ou en Grèce. Depuis une trentaine d'années, de nombreux travaux d'anthropologie culturelle sont venus souligner l'importance de l'esclavage dans les petites sociétés, sans roi et sans État, d'Amérique du Nord ou d'Afrique noire. De simples chefs de village ou des chefs de lignages détenaient quelques esclaves, anciens captifs de guerre pour la plupart, dépourvus de tout droit et travaillant au service de leurs maîtres. Comme ces esclaves étaient sans droit, on pouvait les tuer et un maître pouvait exiger qu'on les tue pour l'accompagner dans la mort. Le fait a été rapporté par de nombreux témoins oculaires, pour différentes régions du monde. C'est tout particulièrement le cas pour plusieurs ethnies de Côte d'Ivoire où, encore en 1895, un ou plusieurs esclaves étaient abattus et servaient de socle pour déposer le cadavre de leur maître. Cet ensemble était enfoui dans des tombes à puits qui rappellent assez celles des cultures du Néolithique européen. ■

ENTRÉE LIBRE

BIODIVERSITÉS

du 20 au 31 octobre 2010

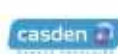
exposition, animations, conférences
dans les jardins du Trocadéro - Paris

www.cnrs.fr/expobiodiversites



www.cnrs.fr

Avec le soutien de



Direct Matin

Direct Soir

L'EXPRESS

SCIENCE

ACTU ENVIRONNEMENT

Info

France Médias

5

HISTOIRE DES SCIENCES

Cendrillon et la querelle de l'argonaute

Naturaliste amateur éclairée, précurseur en aquariologie, Jeanne Villepreux-Power était une autodidacte passionnée. Ses travaux sur l'argonaute ont résolu une captivante controverse de la biologie marine du XIX^e siècle.

Josquin Debaz

Quand, en 1832, Jeanne Villepreux-Power, jeune Corrézienne installée en Sicile, se penche sur l'*Argonauta argo*, mollusque céphalopode d'une dizaine de centimètres vivant dans une coquille, elle se passionne déjà depuis plusieurs années pour la constitution d'un cabinet d'objets marins « durant les rares moments qu'une personne de son sexe et de sa condition peuvent consacrer à l'étude ». L'argonaute est alors peu connu et bien mal décrit. Plusieurs points centraux restent à élucider. Il faut, d'une part, déterminer la position qu'il occupe dans la coquille et, de ce fait, l'usage réel de deux de ses bras, munis d'une membrane à l'extrémité : sont-ils réellement, comme le décrivait Aristote, des voiles grâce auxquelles l'animal utiliserait la force du vent pour se déplacer en surface ? D'autre part, une preuve convaincante est attendue pour départager les partisans d'une coquille construite par le mollusque lui-même de ceux du parasitisme de l'habitable d'un autre animal. L'étude des mollusques – la malacologie – bat son plein, et la réponse à cette question permettrait de préciser la position de ces animaux dans la classification du vivant.

Non seulement Jeanne Villepreux-Power va observer que l'animal occupe toujours la même position dans sa coquille, mais elle va démontrer que ses bras servent à maintenir celle-ci et, surtout, à la construire, résolvant du même coup des siècles d'ambiguïté. En outre, elle constatera l'élasticité de la

coquille, son absence chez l'embryon, ainsi que l'évolution des proportions du céphalopode dans la coquille pour laisser place aux œufs lors de la ponte. Enfin, elle décrira l'usage d'un siphon rétropropulseur et mettra le doigt sur l'important dimorphisme sexuel de l'argonaute.

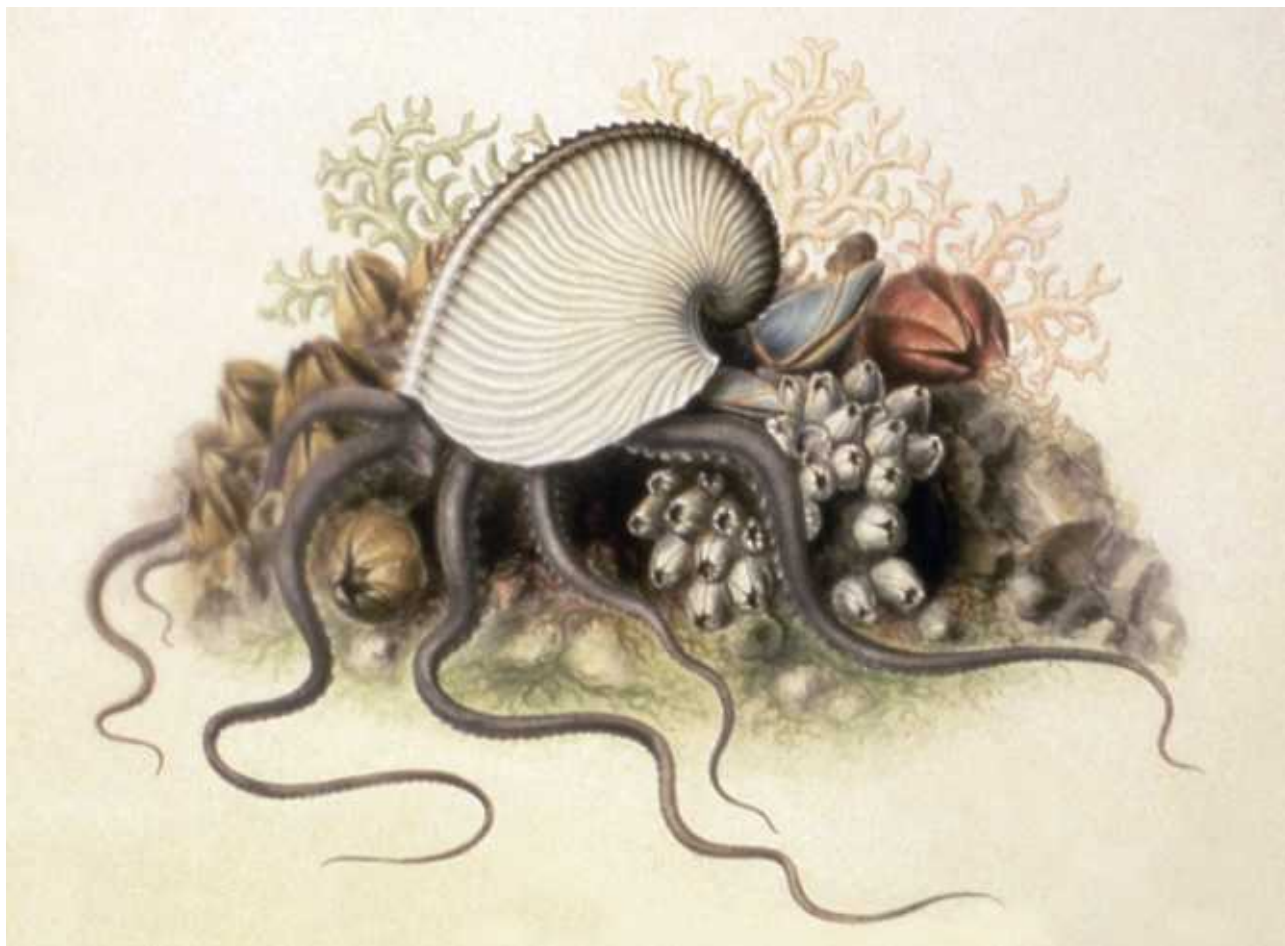
Inventrice d'aquariums

D'origine modeste, Jeanne Villepreux, née à Juillac en 1794, a grandi dans ce petit village du Limousin. Elle est montée à Paris à 18 ans, sans éducation et sachant à peine écrire. Engagée chez une modiste, elle a participé, en 1816, à la création de la robe de mariage des épousailles de Caroline des Deux-Siciles avec Charles Ferdinand d'Artois. L'événement fut très populaire et les broderies de Jeanne firent sensation. Ayant rencontré un négociant, James Power, d'origine irlandaise, mais né à la Dominique, elle l'a épousé en 1818 et s'est installée avec lui à Messine, en Sicile. Là a commencé une nouvelle vie, mondaine, mais aussi savante. Jeanne s'est instruite, a appris l'anglais et l'italien. Elle s'est aussi prise de passion pour l'histoire naturelle, entrant en relation avec les élites naturalistes et confectionnant un cabinet d'histoire naturelle au cours de ses explorations siciliennes.

Dans les années 1830, elle mène des expérimentations et des études sur les mœurs et la biologie de diverses espèces, dont l'argonaute. Pour les besoins de ses recherches,

elle met au point un système pour observer les animaux marins sur de longues périodes. Si déjà l'usage de vases d'eau de mer renouvelée est courant pour l'étude des organismes marins vivants, c'est elle qui, la première, systématise l'usage d'aquariums dans lesquels elle s'efforce de maintenir les conditions de vie nécessaires aux argonautes. Elle les appelle « cages » et les présente à l'Académie de Catane, qui les dénomme *Gabioline* à la Power. La naturaliste en développe trois variantes. Une première forme, en verre, est destinée à l'étude en cabinet ; une deuxième, disposant d'une armature extérieure, tour à tour immergée et émergée, sert à multiplier les observations dans la mer ; enfin, une troisième, en bois et de grande dimension, est munie d'ancres pour être fixée au fond, à une profondeur laissant sa partie supérieure émergée (voir la figure 3).

Inspirée par les travaux du biologiste italien Lazzaro Spallanzani et du naturaliste suisse Charles Bonnet, c'est par l'expérimentation qu'elle entend trancher entre la thèse d'une coquille sécrétée par l'argonaute et celle d'une coquille parasitée. Cette dernière hypothèse est en particulier défendue par Henri-Marie Ducrotoy de Blainville (1777-1850), professeur au Muséum d'histoire naturelle. Élève du naturaliste Georges Cuvier, le zoologiste vient de proposer une classification des mollusques quelque peu différente de celle de son maître, et s'intéresse aux argonautes pour la compléter. L'animal n'étant fixé d'aucune manière à sa coquille et n'ayant aucune partie de son



© Bibliothèque de la Ville de Paris

corps de forme analogue ni de structure comparable à celle-ci, il appelle à la recherche de l'animal producteur de la coquille.

D'où vient la coquille de l'argonaute ?

Pour Jeanne Villepreux-Power, c'est le manque d'observations et d'expériences qui est à la source de cette confusion. Elle entend donc multiplier les premières et les secondes, et la baie de Messine est le lieu idéal pour ce faire, tant abonde l'animal. Elle obtient l'agrément des autorités pour ses expériences, examine plus d'un millier d'argonautes, construit des aquariums pour les observer et, même si « sur cent individus, à peine quinze survivent-ils à cette épreuve et à la captivité », leur reconstitue un régime alimentaire suffisant. Elle désespère quand l'orage détruit les « cages » et

que les argonautes s'échappent ou quand les essais répétés n'aboutissent pas, mais finit par obtenir l'environnement adéquat et les observations attendues, et met même au point un liquide de conservation idoine.

En septembre 1833, pour déterminer les capacités de sécrétion de la coquille par l'argonaute, elle casse « en divers endroits les coquilles de vingt-sept » d'entre eux. Les argonautes obturent alors les brèches et les colmatent avec des morceaux de coquilles laissés à leur disposition et les sécrétions de leurs bras membraneux. La naturaliste présente ses résultats à l'Académie de Catane en 1834 et, après avoir été invitée à confirmer ses observations, elle répète l'épreuve ; elle obtient le même succès et, du même coup, le soutien d'un professeur sicilien, Carmelo Maravigna (1758-1851).

En 1835, elle confie une copie manuscrite de son mémoire en italien à Sander

1. L'ARGONAUTA ARGO, sur une aquarelle de la main de Jeanne Villepreux-Power réalisée en 1839 d'après les spécimens qu'elle étudiait en Sicile.

L'AUTEUR



Josquin DEBAZ est historien des sciences et chercheur au sein du Groupe de sociologie pragmatique et réflexive, à l'École des hautes études en sciences sociales (EHESS), à Paris.

UN GUIDE SCIENTIFIQUE DE LA SICILE

Vers 1838, alors qu'elle prépare son départ de Messine, Jeanne Villepreux-Power s'octroie une dernière exploration de son île, parcourant « dans tous les sens, province par province, plusieurs fois toute la Sicile pour faire des collections d'histoire naturelle et d'antiquité ». Elle prépare alors un guide scientifique, historique et statistique du pays. S'il est principalement destiné à documenter le voyageur, l'ouvrage est assorti de diverses informations visant à satisfaire aussi les curiosités naturalistes. Parmi les lieux à visiter, entre les églises et les monuments, figurent les cabinets privés

d'histoire naturelle, et l'auteur fournit en appendice divers catalogues établis en relation avec ses collections personnelles et fondés sur les classifications en usage (celle de Linné pour les plantes, celle de Cuvier pour les mollusques et les fossiles, etc.). Elle dénombre ainsi notamment près de 700 espèces végétales, plus de 267 espèces d'oiseaux, plus de 600 poissons et des centaines de fossiles et de minéraux récoltés sur l'Etna, dont elle liste 75 éruptions.

La carte de Sicile associée au guide de Jeanne Villepreux-Power.



V. Power, Guide de la Sicile, 1842 - Studio Silvestre, 2018

Rang, ancien rescapé du naufrage de la Méduse et auteur, en 1829, d'un manuel sur les mollusques, afin qu'il présente ce travail à l'Institut, mais n'obtient en réponse qu'un « silence obstiné ». Quelque temps plus tard, elle lit une critique de de Blainville concernant l'argonaute et sa coquille, mais c'est Rang qui y tient le rôle principal, tandis que la naturaliste aurait simplement proposé à

ment la coquille, laissant un vide dans sa partie postérieure ; leur forme n'offre d'ailleurs aucune analogie avec celle de la coquille. Le corps du céphalopode est coloré, ce qui nécessite une exposition à la lumière, or la coquille est trop opaque pour avoir permis une telle pigmentation. De même, elle est trop épaisse et trop rigide pour conférer à l'animal la souplesse nécessaire à son déplacement et à sa respiration. Dans les expériences de Villepreux-Power à Messine et de Rang à Alger, poursuit de Blainville, l'animal n'indique aucune souffrance lorsqu'on le sépare de sa coquille. Enfin, le zoologiste invoque la description d'un individu découvert sans coquille et considéré comme une espèce à part entière.

LE MOLLUSQUE OCCUPE UNE COQUILLE

dès ses premiers stades de développement et ne s'en empare donc pas juste pour protéger ses œufs.

celui-ci de répéter ses expériences. Il lui faut alors défendre sa priorité et, lors d'un voyage à Paris en 1839, elle visite de Blainville, qui l'engage à poursuivre ses expériences, puis l'anatomiste britannique Richard Owen (1804-1892), à Londres, qui va prendre sa défense. La bataille dépasse désormais notre seule naturaliste amateur, mais ce sont ses préparations et ses collections qui vont en déterminer l'issue.

De Blainville s'appuie sur huit arguments principaux issus de descriptions de l'argonaute ou plus générales, notamment celle présentée par Rang, auquel il s'oppose. Tout d'abord, il postule que les mêmes espèces de céphalopodes n'ont pas toujours été trouvées dans les mêmes espèces de coquilles et que la position de l'animal dans la coquille, telle qu'elle a été rapportée par ses différents observateurs, varie. En outre, les animaux qu'il a pu observer n'occupaient pas entière-

En 1839, Owen clôt la controverse en présentant à la *Zoological Society* un argumentaire fondé sur une collection de l'*Argonauta argo* réunie par Jeanne Villepreux-Power, posant la supériorité du nombre d'individus la composant, de la qualité de la collection, de l'étude expérimentale et *in vivo* des organismes, de la reproductibilité des opérations par rapport à une observation « de cabinet ». La collection repose sur trois séries qui répondent à des besoins argumentatifs spécifiques.

La première série est composée de 20 spécimens conservés dans une solution alcoolique, à différentes étapes de croissance et de tailles variées. Elle permet de constater, en premier lieu, que l'animal occupe toujours la même position dans la coquille quel que soit son stade de développement. Sur certains exemplaires, les bras membra-

✓ À ÉCOUTER

La partie « actualités » de l'émission **La marche des sciences** du 21 octobre 2010, sur *France Culture*, sera consacrée à Jeanne Villepreux-Power. À écouter sur le site : <http://www.franceculture.com>

neux accrochent encore la coquille, illustrant ainsi leur position normale et démontrant qu'ils ne peuvent être utilisés comme des « voiles » propulsant l'individu.

Parmi eux, les dix spécimens les plus jeunes, encore sans œufs, montrent un corps occupant l'intégralité de la coquille et dont la forme lui correspond en tout point. Les spécimens plus âgés montrent que quand l'ovarium se développe, un espace se crée entre le corps de l'animal et la coquille à l'arrière de celle-ci ; d'abord occupé par le mucus, il sert ensuite de logement protecteur pour les œufs. Owen peut ainsi démontrer que le mollusque occupe une coquille dès ses premiers stades de développement, avant la ponte, et qu'il ne s'en empare donc pas juste à ce moment pour protéger ses œufs.

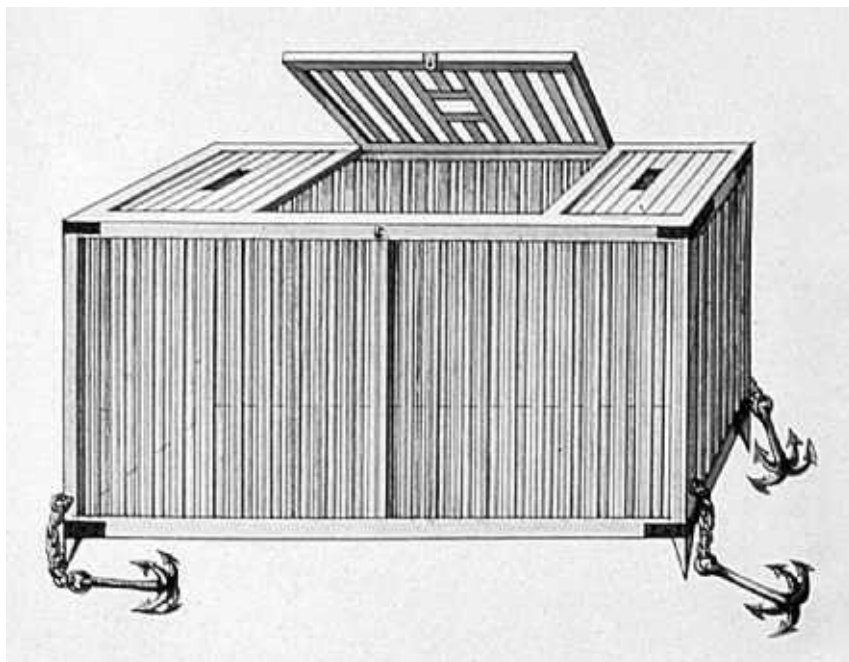
L'argonaute n'est pas un parasite

Le nombre de spécimens exposés est suffisant pour constituer un tableau statistique dans lequel croissent proportionnellement le poids de l'animal et la taille de la coquille ; cela s'oppose à la théorie du parasitisme, puisque dans de tels cas, à l'exemple du bernard-l'ermite, les petits individus occupent fréquemment des coquilles plus grandes que nécessaire, et bien souvent d'espèces différentes. Grâce à ce tableau, on constate aussi la rapidité de croissance des argonautes : si le céphalopode avait été un parasite, il aurait dû changer de coquille presque chaque jour pour ne pas être à l'étroit, et l'organisme parasité aurait dû produire suffisamment de coquilles pour permettre ces déménagements multiples. Une telle proportion rend alors étrange le fait qu'il ait pu échapper à la vigilance des personnes observant l'*Argonauta argo* dans son milieu naturel, ainsi qu'à l'attention des très nombreux collectionneurs. Owen peut dès lors contester l'argument de de Blainville selon lequel ce n'est pas parce qu'une chose n'a pas été encore trouvée qu'elle n'existe pas : bien que non réfutable, cette proposition perd de sa validité quand augmentent le nombre d'observateurs et le nombre putatif d'événements observables.

Dans cette première série, tous les spécimens dépourvus d'œufs ont été disséqués et se sont révélés être aussi des femelles ; la coquille présente donc un caractère sexuel, qui implique soit que le mâle a un aspect très différent de la femelle, soit que l'animal est hermaphrodite. La première hypothèse s'avérera la bonne. Enfin, grâce à la qualité des spécimens et du liquide employé pour leur conservation, on s'aperçoit que si les coquilles sèches sont habituellement rigides, à l'état naturel, elles sont élastiques et transparentes, permettant, d'une part, le développement de pigmentations sur l'animal et, d'autre part, les facultés respiratoires et locomotrices de l'occupant.

2. JEANNE VILLEPREUX-POWER, figure de proue de la science, peinture sur soie d'Anne-Lan (2008). Connue et appréciée au XIX^e siècle – la naturaliste s'était vu dédier deux noms d'espèces (*Vinciguerrria poweriae* et *Carcinoccocus poweriae*), le zoologiste Edmond Perrier l'avait décrite comme le précurseur des stations de biologie marine, et Owen comme celui de l'aquariologie –, Jeanne Villepreux-Power sombra ensuite peu à peu dans l'oubli. Elle est aujourd'hui exhumée par un autre juillacois, Claude Arnal, qui lui a notamment obtenu le nom d'un cratère de Vénus.





© Bibliothèque centrale M.N.H.N. Paris

3. LA « CAGE À LA POWER », aquarium en bois muni d'ancres que Jeanne Villepreux-Power conçut pour étudier l'argonaute dans son milieu naturel : posée sur le sol marin à une profondeur laissant la partie supérieure émergée, elle permettait à la naturaliste de maintenir ses spécimens dans de bonnes conditions physiologiques tout en les gardant à portée de main.

La deuxième série de la collection de Jeanne Villepreux-Power est constituée d'œufs d'*Argonauta argo* à différents stades de développement. Cette série montre l'absence de coquille à ces stades. La présentation d'un tel résultat peut sembler paradoxale puisqu'elle sert l'hypothèse du parasitisme, mais il s'agit là de valider le sérieux et la crédibilité du témoignage de la naturaliste.

Enfin, une troisième série comprend six coquilles témoins de l'expérimentation de Jeanne Villepreux-Power. Un fragment a été retiré à chacune d'elles du vivant de l'argonaute. La coquille a ensuite été séparée de son occupant entre dix minutes et deux mois après la fracture. Ces coquilles représentent donc la séquence de réparation de la coquille par l'argonaute. On observe tout d'abord une fine membrane transparente à l'endroit du prélèvement ; puis, un dépôt calcaire se forme peu à peu sur cette membrane, prolongeant une partie intacte de la coquille. Si la réparation est d'abord bien visible, la différence s'atténue avec le temps. L'expérience invalide ainsi les doutes de Rang qui, lors de la même expérience, trouvait que la structure de la réparation différait trop de celle de la coquille intacte.

Owen pose cette importante collection comme suffisante pour affirmer ou infirmer les positions de Jeanne Villepreux-Power. Elle lui permet de s'opposer directement aux six premières observations de de Blainville. Il ne lui reste alors qu'à infirmer ses deux derniers postulats. Pour Owen, l'absence de perturbation du mollusque lors des expériences de séparation de la coquille prouve qu'il n'a pas un besoin instinctif de voler une coquille comme chez les parasites, bernard-hermite en tête. En outre, les observations de Villepreux-Power et de Rang indiquent que l'argonaute finit par succomber à la séparation. Enfin, contre l'ultime argument de de Blainville selon lequel un individu sans coquille constituerait le représentant d'une nouvelle espèce, Owen souligne que la définition qui en a été donnée demeure si vague qu'elle peut être appliquée à tous les *Octopus* et que, ainsi tirée dans le sens du parasitisme, elle en est d'autant moins crédible.

Estimée, puis oubliée

Le talent de Jeanne Villepreux-Power a été d'imaginer et de construire un système expérimental, de maintenir les argonautes en vie dans ses aquariums et de conserver correctement les spécimens pour amener la preuve jusque dans les institutions et l'y défendre. En effet, plus que par l'expérience et l'observation *in situ*, c'est en déplaçant une collection d'échantillons impeccable que cette « accomplished lady » a pu convaincre de ses thèses scientifiques, tant en Sicile qu'à Londres.

Affiliée à une quinzaine d'académies des sciences en Europe, Jeannette Power est élue membre correspondant de la *Zoological Society* en 1839. Au début des années 1840, le couple quitte l'île pour Paris et Londres, où elle tente de compléter ses travaux malgré la disparition de ses collections lors du naufrage du *Bramley*. À la fin des années 1850, elle publie des travaux de ses années messinoises, en partie pour faire valoir son antériorité dans une époque férue de biologie marine et d'aquariums. Après une ultime publication originale sur les corps météoriques, elle s'éteint à 77 ans dans son village natal et sombre peu à peu dans l'oubli.

BIBLIOGRAPHIE

Jeannette Power, *Guida per la Sicilia*, (réimpr. sous la dir. de Michela D'Angelo), Istituto di studi storici Gaetano Salvemini, 2008 (1842).

Claude Arnal, *Jeanne Villepreux-Power 1794-1871. Le destin exceptionnel d'une naturaliste oubliée*, Musée du Cloître de Tulle, 2007.

Nadine Lefebure, *Femmes océanes. Les grandes pionnières maritimes*, Glénat, 1995.

Claude Duneton, *La Dame de l'argonaute* [roman], Denoël, 2009.



www.enseignementsup-recherche.gouv.fr

metro

images
DOC

bayard

OKAPI

POUR LA
SCIENCE

NRJ
HIT MUSIC ONLY !

fête de la SCIENCE

21 au 24 octobre 2010

www.fetedelascience.fr

 LOGIQUE & CALCUL

Les nombres premiers insolites

Repérer les nombres premiers dotés des plus étranges propriétés est un passe-temps qui demande imagination, persévérance et savoir-faire arithmétique.

Jean-Paul DELAHAYE

L'amour des mathématiques conduit les esprits sérieux à s'attaquer à des problèmes reconnus difficiles, dont la résolution nécessite abnégation, abstraction et aptitudes hors du commun. Pour les esprits simplement amoureux des nombres et des structures combinatoires, un travail mathématique d'une autre nature et plus facile à partager avec autrui demande uniquement imagination et patience.

Les Américains Chris Caldwell et Garland Honaker viennent de publier un livre, *Prime Curios ! The Dictionary of Prime Number Trivia* (Curiosités premières. Le dictionnaire des nombres premiers futiles). Cet ouvrage est le meilleur exemple de mathématiques sans prétention, intéressantes, pratiquées pour le plaisir et l'amusement. Dans cette rubrique, en mai 2009, nous parlions des dictionnaires de nombres de toutes sortes. Ici, il s'agit d'un dictionnaire très spécialisé et purement ludique. Nous allons voir cependant

que son élaboration a exigé une créativité et une passion hors du commun.

Un nombre premier pour la nitroglycérine

Le jeu consiste à rechercher parmi les nombres premiers – ou parfois les nombres entiers ayant un rapport avec les nombres premiers – ceux qui ont un intérêt inattendu. Cet intérêt sera dû à une ou plusieurs propriétés surprenantes et simples, ou pas trop

1. Le nombre premier 313 est spécialement intéressant

Tous les nombres premiers assez petits possèdent bien sûr des propriétés particulières. Mais parmi les nombres premiers de trois chiffres, le nombre 313 est particulièrement intéressant. Voici quelques-unes de ses propriétés remarquables.

- 313 est un nombre premier palindrome (on peut le lire de droite à gauche ou de gauche à droite).
- 313 écrit en base 2 est encore un nombre palindrome : 100111001. Plus étonnant, le nombre dont l'écriture en base 10 est 100111001 est encore un nombre premier palindrome.
- $10^{313} + 313$ est encore un nombre premier.
- 313 est la somme de deux carrés consécutifs : $313 = 12^2 + 13^2$.
- Si 313 personnes sont choisies au hasard, la probabilité pour que cinq d'entre elles aient le même jour anniversaire dépasse 50 %, et 313 est le plus petit nombre ayant cette propriété.



- 313 est le plus petit nombre « faiblement premier » en base 5 : écrit en base 5, si vous changez un seul de ses chiffres, vous obtenez toujours un nombre composé.
- 313 est le numéro de la plaque d'immatriculation de Donald depuis 1938 quand il apparaît dans les dessins de Walt Disney.
- En intervertissant les 1 et les 3 dans 313, ce qui donne 131, on obtient un autre nombre premier palindrome.
- L'équation $313(x^3 + y^3) = z^3$ est une équation remarquable, car ses plus petites solutions en nombres entiers comportent plus de 1 000 chiffres.
- 313 est le septième nombre premier dont la somme des chiffres est 7.
- $1/313$ donne une suite de chiffres décimaux qui ne se répète que lorsque l'on arrive à la 313^e décimale.
- D'autres propriétés sur : <http://primes.utm.edu/curios/page.php?short=313>

compliquées, qui montrent à l'évidence que le nombre sélectionné mérite d'être connu et mis en valeur... du moins pour tous ceux qui ont le goût de l'étrangeté mathématique. Voici d'abord six exemples.

- 987 654 103 mérite une attention particulière, car c'est le plus grand nombre premier dont tous les chiffres sont différents.
- 3 539 est un premier remarquable, car $C_3H_5N_3O_9$ est la formule de la nitroglycérine.
- 21 322 319 est le plus petit nombre premier autodescriptif : quand on en compte les chiffres, cela le reconstitue, car il comporte deux « 1 », trois « 2 », deux « 3 » et un « 9 ».
- 85 837 vérifie l'égalité : $85837 = 8! + 5! + 8! + 3! + 7! + (8 + 5 + 8 + 3 + 7)$; c'est le seul nombre premier possédant cette propriété.
- 43 252 003 274 489 855 999 est le nombre de configurations dérangées du cube de Rubik et c'est le nombre premier préféré de G. Honaker. Avec la position rangée du cube, cela fait 43 252 003 274 489 856 000 configurations possibles au total.
- 905 est un entier intéressant. En effet, la plupart des nombres impairs s'écrivent comme la somme d'un nombre premier et

d'une puissance de 2 : $3 = 2 + 1$, $5 = 3 + 2$, $7 = 3 + 4$, $9 = 7 + 2$, $11 = 7 + 4$, $13 = 5 + 8$, $15 = 7 + 8$, $17 = 13 + 4$, $19 = 3 + 16$, $21 = 5 + 16$, etc. Les exceptions, dénommées parfois *nombre obstinés*, sont en nombre infini, mais ont une faible densité. L'entier 905 est le plus petit nombre obstiné composé.

Le fruit d'un travail collaboratif

Le dictionnaire n'est pas le résultat du travail de deux auteurs seulement et se fonde sur les richesses patiemment accumulées du site Internet *Prime Curios* : <http://primes.utm.edu/curios/>

Toute une communauté d'amateurs depuis des années enrichit la collection de ce site auquel tout le monde peut contribuer. Le dictionnaire qui vient d'être publié est composé d'une sélection opérée en 2009 des meilleures trouvailles du site. Il est destiné à être emmené avec soi, en métro, dans la salle d'attente de votre médecin, sur la plage ou pour faire la queue à la poste. Un paragraphe à la fois, vous en dégusterez au hasard les meilleures définitions. Sur votre lieu de travail... vous pourrez discrè-

tement poursuivre l'exploration en vous connectant au site Internet où vous utiliserez la fonction *random* de la page principale qui vous fera découvrir les nombres et définitions qui enrichissent chaque jour la base de données *Prime Curios*.

Peut-être voudrez-vous être l'un des collaborateurs du site et voir votre nombre premier personnel donner naissance à une nouvelle page où votre nom apparaîtra. Pour cela, il faut imaginer une définition nouvelle qui n'exige pas plus de 100 caractères, à laquelle correspondra un nombre en rapport avec les nombres premiers. Il faut bien sûr que personne n'ait proposé la même curiosité avant vous.

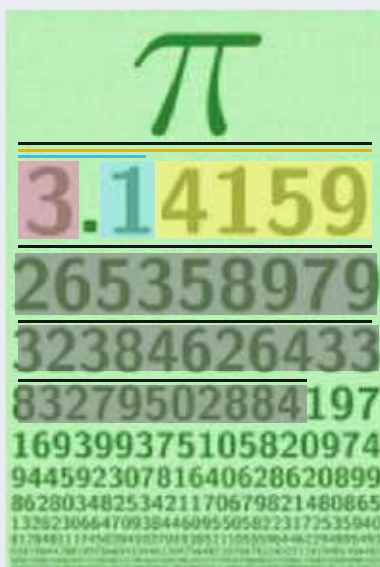
Chaque responsable du site (et auteurs du livre) a son propre rôle. G. Honaker est l'éditeur de contenu et c'est lui qui est à l'origine de cette collection commencée il y a une quinzaine d'années. Il décide de l'acceptation d'une proposition nouvelle et rédige les pages avec les définitions. Ch. Caldwell joue le rôle d'éditeur technique. Il gère les aspects informatiques du site et en particulier la mise en page des données, les programmes qui engendrent les index et les sauvegardes.

2. Quelques différents types de nombres premiers

A. Les **bons nombres premiers** : par définition, ils doivent être strictement supérieurs à la moyenne géométrique du nombre premier qui les précède et du nombre premier qui les suit : $(p_n)^2 > p_{n-1} p_{n+1}$. Voici la liste : 5, 11, 17, 29, 37, 41, 53, 59, 67, 71, 97, 101, 127, 149, 179, 191, 223, 227, 251, 257, 269, 307, 311, 331, 347, 419, 431, 541, 557, 563, 569, 587, 593, 599, 641, 727, ...

B. Les **nombres premiers de Fibonacci** sont bien sûr les nombres de la suite de Fibonacci ($F(0) = 1$, $F(1) = 1$, $F(n+2) = F(n) + F(n+1)$ pour $n > 1$) qui sont, en outre, premiers.
2, 3, 5, 13, 89, 233, 1597, 28657, 514229, 433494437, 2971215073, 99194853094755497, 1066340417491710595814572169, 19134702400093278081449423917...

C. Les **π -nombres premiers** qui sont les nombres premiers qu'on trouve quand on considère les n premières décimales du nombre



$\pi = 3,141\,592\,653\,589\,793\,238\,462\,643\,383\,...$
On en connaît aujourd'hui sept (**nous donnons les premiers**) correspondant à $n = 1$ (3), 2 (31), 6 (314159), 38, 16208, 47577, 78073. Celui correspondant à 78073 a été trouvé en 2006.

D. Les **nombres premiers factoriels** : ce sont ceux de la forme $n! + 1$ ou $n! - 1$

Ceux de la forme $n! - 1$ correspondent aux valeurs de n suivantes : 3, 4, 6, 7, 12, 14, 30, 32, 33, 38, 94, 166, 324, 379, 469, 546, 974, 1963, 3507, 3610, 6917, 21480, 34790.

Ceux de la forme $n! + 1$ correspondent aux valeurs de n suivantes : 0, 1, 2, 3, 11, 27, 37, 41, 73, 77, 116, 154, 320, 340, 399, 427, 872, 1477, 6380, 26951. On n'en connaît pas d'autres, car la fonction factorielle croît très vite et il devient difficile, voire impossible, de tester la primalité des nombres engendrés par les expressions $n! - 1$ et $n! + 1$.

3. Quelques nombres premiers curieux

1 025 327

Le plus petit *reimerp* (nombre aussi premier quand on inverse l'ordre de ses chiffres), qui ne contient que des chiffres premiers et les contient tous.

37 330 116 097

En partant de 37 330 116 097 et en additionnant les deux nombres premiers qui suivent (ce qui fait une somme de trois nombres premiers), on obtient un nouveau nombre premier 111 990 348 347.

En partant de ce nombre et en additionnant les quatre nombres premiers qui suivent (ce qui en fait cinq consécutifs), on obtient un nouveau nombre premier.

En poursuivant de la même façon, on obtient toujours des nombres premiers, jusqu'à une somme de 19 nombres premiers.

122 334 444 555 553

Le plus petit nombre premier contenant un « 1 », deux « 2 », trois « 3 », quatre « 4 », cinq « 5 ».

7 469 789

Le premier nombre d'une paire de nombres premiers consécutifs qui sont tous les deux faiblement premiers (un nombre est faiblement premier si, en changeant l'un de ses chiffres par un autre, on tombe toujours sur un nombre composé).

7 284 717 174 827

Ce nombre premier palindrome (il peut se lire de droite à gauche ou de gauche à droite) donne encore

un nombre palindrome si on l'écrit en base 2 : 11010100000000110101111101011000000101011. De plus, sa longueur en base 10, qui est 13, et la longueur de son écriture en base 2, qui est 43, sont tous les deux des nombres premiers.

14 444 999 999 999

Nombre premier qui est la mise bout à bout des chiffres qui sont des carrés non nuls (1, 4, 9) répétés autant de fois que leur valeur.

1 311 753 223 571 113

Ce nombre premier est obtenu comme la concaténation des nombres premiers de 13 à 2 par ordre décroissant, suivie de la concaténation des mêmes nombres par ordre croissant 13, 11, 7, 5, 3, 2, 2, 3, 5, 7, 11, 13. Ce qui donne une sorte de palindrome.

37 104 124

Ce n'est pas un nombre premier, mais il est très intéressant, car 37 104 124 est égal à la somme de $3! \times 7! \times 1! \times 0! \times 4! \times 1! \times 2! \times 4!$ et du nombre de nombres premiers plus petits que 37 104 124. C'est le seul nombre connu ayant cette propriété.

172 909 271

Le plus petit nombre premier palindrome qui contienne le célèbre nombre de Ramanujan 1 729 (le plus petit nombre représentable de deux façons comme somme de deux cubes $1729 = 1^3 + 12^3 = 9^3 + 10^3$).

15 618 090

Égal à $2 \times 3 \times 5 \times 487 \times 1069$, il n'est pas premier, mais c'est le plus petit entier dont la décomposition en facteurs premiers utilise chacun des dix chiffres une fois et une seule.

1 873

C'est en 1873 que Charles Hermite démontra que le nombre *e* était un nombre transcendant.

3 778 888 999

Le plus petit nombre premier ayant une persistance multiplicative de 10. La persistance multiplicative d'un nombre est le nombre d'étapes avant stabilisation qu'il faut faire quand on le remplace par le produit de ses chiffres.

Ainsi $721 \rightarrow 14 \rightarrow 4 \rightarrow 4$, donc 721 a une persistance multiplicative de 3.

16 719

Le 16719^e siècle sera le premier siècle n'ayant aucune année égale à un nombre premier.

619 737 131 179

Le plus grand nombre tel que deux chiffres consécutifs donnent toujours un nombre premier et tel que tous les nombres premiers ainsi obtenus soient différents.

1000...00081918000...0001

(1001 chiffres en tout). Le plus petit nombre premier palindromique de plus de 1 000 chiffres.

Sans Internet qui permet un travail collaboratif remarquable, cette collection n'aurait pas acquis sa richesse actuelle. L'informatique et l'existence des réseaux conduisent au développement de nouvelles formes d'activités et de savoirs mathématiques. Le 29 juin 2010, il y avait 10 277 curiosités singularisant 7 193 nombres différents (des curiosités différentes donnent parfois le même nombre). Comme le disent les auteurs, cela laisse une place infinie à vos propres découvertes.

Bien sûr, la fameuse astuce du paradoxe de Bechembach s'applique au site : tout nombre mérite d'être présent dans la base de *Prime Curios*, le plus petit nombre qui n'y est pas étant intéressant parce qu'il pos-

sède la propriété de ne pas y être... et donc doit y être. Mais c'est une boutade et puisque ce plus petit nombre qui n'y est pas change au cours du temps, Ch. Caldwell et G. Hona-ker ont simplement choisi de considérer qu'il ne s'agit pas d'un nombre curieux et de ne pas l'y mettre : le paradoxe est contourné.

Plus de 7 000 nombres premiers différents

L'avantage du site est qu'on y trouve aussi un algorithme qui teste la primalité : <http://primes.utm.edu/curios/includes/primetest.php>. Pour la factorisation des nombres entiers, nous vous recommandons <http://www.alpertron.com.ar/ECM.HTM>, qui

est remarquablement efficace et rapide. Cet algorithme vous permettra de tester vos idées et vous aidera à mener vos recherches dans le but de proposer un nombre premier intéressant. Le dictionnaire ou le site Internet seront utiles aux amateurs de programmation et aux enseignants à la recherche d'exercices informatiques nouveaux et parfois non triviaux.

Voici trois exemples d'exercices de programmation directement tirés du dictionnaire.

- Faire un programme qui trouve le plus petit nombre premier *p* tel que *p* et le nombre premier *p'* qui le suit soient composés uniquement de chiffres qui sont des cubes (0, 1, 8). La réponse est 100 801, qui est suivi par le nombre premier 100 811.

• Trouver le nombre premier p_1 qui commence une suite de six nombres premiers consécutifs $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$, chacun d'eux ayant pour somme de ses chiffres le même entier qui doit être un nombre premier.

La réponse est 354 963 229, dont la somme des chiffres est 43, et qui est suivi par les cinq nombres premiers : 354 963 283, 354 963 319, 354 963 337, 354 963 373, 354 963 391, dont la somme des chiffres est à chaque fois 43.

• Trouver le plus petit nombre entier ne se terminant pas par des zéros et qui peut s'écrire comme la somme du carré de deux nombres premiers distincts de quatre façons différentes.

La réponse est 39 338, qui s'écrit :

$$39\,338 = 23^2 + 197^2 = 97^2 + 173^2 = 107^2 + 167^2 = 113^2 + 163^2.$$

Démonstration automatique

Si on y réfléchit un peu, on est amené à conclure que le dictionnaire doit être considéré comme une immense collection de théorèmes mathématiques donnés sans démonstration. Dans la plupart des cas, un ordinateur et un programme sont nécessaires pour contrôler la justesse des affirmations proposées, car une démonstration directe avec un papier et un crayon est impossible ou demanderait bien trop de temps et de patience.

Le dictionnaire et le site Internet peuvent donc être vus aussi comme des collections d'énoncés arithmétiques non démontrables par le mathématicien seul, qui est contraint de s'adjoindre une machine pour explorer ce type de vérités mathématiques. Il s'agit d'une base de résultats mathématiques démontrés par ordinateur et non démontrables humainement.

L'informatique est donc utile pour ce dictionnaire pas uniquement pour coordonner le travail entre amateurs et organiser la base de données des résultats ; elle joue aussi un rôle central dans la recherche, la preuve et le contrôle de chacune des milliers de propriétés sélectionnées. Les rapports entre mathématiques et informatique

sont de plus en plus resserrés et c'est aussi vrai dans le domaine des mathématiques récréatives.

Le tableau d'honneur des plus prolifiques producteurs de nombres premiers curieux indique la liste de neuf noms d'amateurs ayant proposé chacun plus de 200 entrées. Le contributeur classé premier est Shyam Sunder Gupta, qui est à l'origine de 606 entrées du dictionnaire. Il est suivi de Jonathan Vos Post, à qui l'on doit 519 entrées. Il faut admirer la quantité de travail de programmation, la patience et l'inventivité extrême exigées pour arriver à de tels résultats.

Exécutable et illégal ?

Parmi les curiosités les plus troublantes, il y a celle des *nombres premiers exécutables*. Un nombre premier peut toujours être écrit en base 2, auquel cas il représentera parfois un programme informatique pour un type particulier de machines.

Les microprocesseurs les plus courants ayant des instructions d'un octet (8 bits) sont ceux de la série x86. La plus petite instruction est alors celle associée au nombre 195 qui exécute l'instruction RET (*return*). Cet octet peut être écrit dans un fichier de type .com et constituera alors un programme exécutable pour les machines DOS (*Windows*). Malheureusement, 195 n'est pas un nombre premier.

Selon Phil Carmody, qui a étudié le problème de près, les trois plus petits nombres premiers exécutables sont : $38 \times 256 + 195 = 9\,923$, $46 \times 256 + 195 = 11\,971$, $47 \times 256 + 195 = 12\,227$, qui ne font rien de très intéressant, mais sont d'authentiques programmes !

Le premier nombre premier exécutable réalisant quelque chose d'intéressant (avec les mêmes règles du jeu que précédemment) est un nombre de 1 811 chiffres décimaux qui commence par : 4 931 083 597 028 501 900 27 577 672 390 764 957 284 907 721 502 0 (voir http://primes.utm.edu/curios/page.php?number_id=1214 pour la liste complète des chiffres).

Ce nombre retranscrit en binaire est équivalent à un petit programme écrit par Charles Hannum qui implémente DeCSS, un

L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

Ch. Caldwell, *The Prime Pages* (records, listes diverses, etc.), <http://primes.utm.edu/>

Ch. Caldwell et G. L. Honaker, *Prime Curios !* : <http://primes.utm.edu/curios/>

Chr. Caldwell et G. L. Honaker, *Prime Curios ! The Dictionary of Prime Number Trivia*, BookSurge, 2009.

J.-P. Delahaye, *Mille collections de nombres, Pour la Science*, n°379, pp. 88-93, mai 2009.

J.-P. Delahaye, *Merveilleux nombres premiers, Pour la Science/Belin*, 2010.

J. Moyer, *Some Prime Numbers* (page pour obtenir des listes de nombres premiers et des programmes pour les calculer) : <http://www.rsok.com/fjrm/printprimes.html>

Wikipedia, *List of prime numbers* (des catégories particulières de nombres premiers) : http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_prime_numbers

Wikipedia, *Primality test* (informations et liens sur les tests de primalité) : http://en.wikipedia.org/wiki/Primality_test

© Pour la Science - n° 396 - Octobre 2010

Pariscience

festival international
du film scientifique

du 7 au 12 octobre 2010



6^e édition

Jardin des Plantes / Muséum national d'Histoire naturelle

Réservation conseillée sur
www.pariscience.fr

ast
association sciences & artistes



ART & SCIENCE

Les yeux de Rembrandt

Le maître flamand jouait sur les textures, associant zones détaillées et zones plus floues, pour guider le regard des spectateurs.

Loïc MANGIN

Lorsque nous regardons un paysage ou une œuvre d'art, nous n'en avons pas une vision uniformément détaillée. En effet, la rétine ne dispose que d'une petite zone (de la taille de l'ongle du pouce vu au bout du bras tendu) où la densité de cellules réceptrices est suffisante pour nous fournir une image précise. Aussi, nos yeux doivent-ils parcourir, par une série de mouvements rapides alternant avec des moments fixes, l'ensemble d'une scène pour que nous en ayons une perception globale. Le regard est donc un processus interactif dans lequel l'image mentale d'un tableau dépend notablement de la succession des phases de fixation.

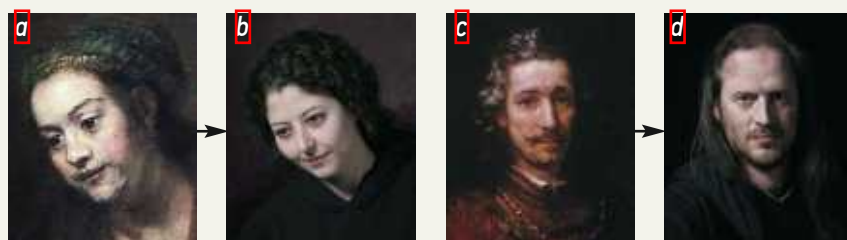
Plusieurs artistes contemporains exploitent ce fonctionnement de la vision dans la conception de leurs œuvres. Par exemple, le peintre américain John Howard Sanden explique qu'il joue sur le niveau de détail dans certains de ses portraits pour diriger l'œil du spectateur vers une zone particulière de son choix. Ce faisant, il insisterait sur des traits de caractère du modèle qu'il souhaite mettre en avant. Le peintre utilise également de grands coups de pinceaux qui, orientés dans une direction privilégiée, guident le regard vers une zone accentuée, plus riche en détails.

Ce type de stratagème est-il réservé aux peintres de notre époque au fait des travaux des neurobiologistes et des spécialistes de la perception ? D'autres peintres ont-ils exploité la texture et le niveau de détail dans une peinture pour diriger le regard du public ? Selon Steve DiPaola, de

l'Université Simon Fraser, à Vancouver, et ses collègues du *Vision Lab* de l'Université de Colombie-Britannique, au Canada, le pionnier serait Rembrandt !

Pour le montrer, ils ont analysé plusieurs portraits et autoportraits du maître flamand (page ci-contre, portrait daté de 1659) afin d'identifier les facteurs qui expliqueraient leur attrait. Une de leurs expériences a consisté à « recréer » quatre des plus

attarde beaucoup plus longuement qu'ailleurs, ralentissant la succession de saccades : le regard se pose. En outre, la transition de zones au contraste marqué vers celles moins tranchées guiderait le regard à travers le portrait. On parle de technique aux « bords perdus et retrouvés ». De plus, les observateurs ont préféré les portraits où leur regard est pris en charge plutôt que les photographies uniformes. L'emploi de tex-



célèbres portraits de l'artiste avec des photographies (voir a, b, c et d). Sur ces copies, un programme informatique permettait d'accentuer le détail de certaines zones, par exemple les yeux ou le bas des joues (e), et d'en rendre plus floues d'autres de façon à retrouver la texture des œuvres originales (f et g), ou bien, à l'inverse de s'en éloigner.

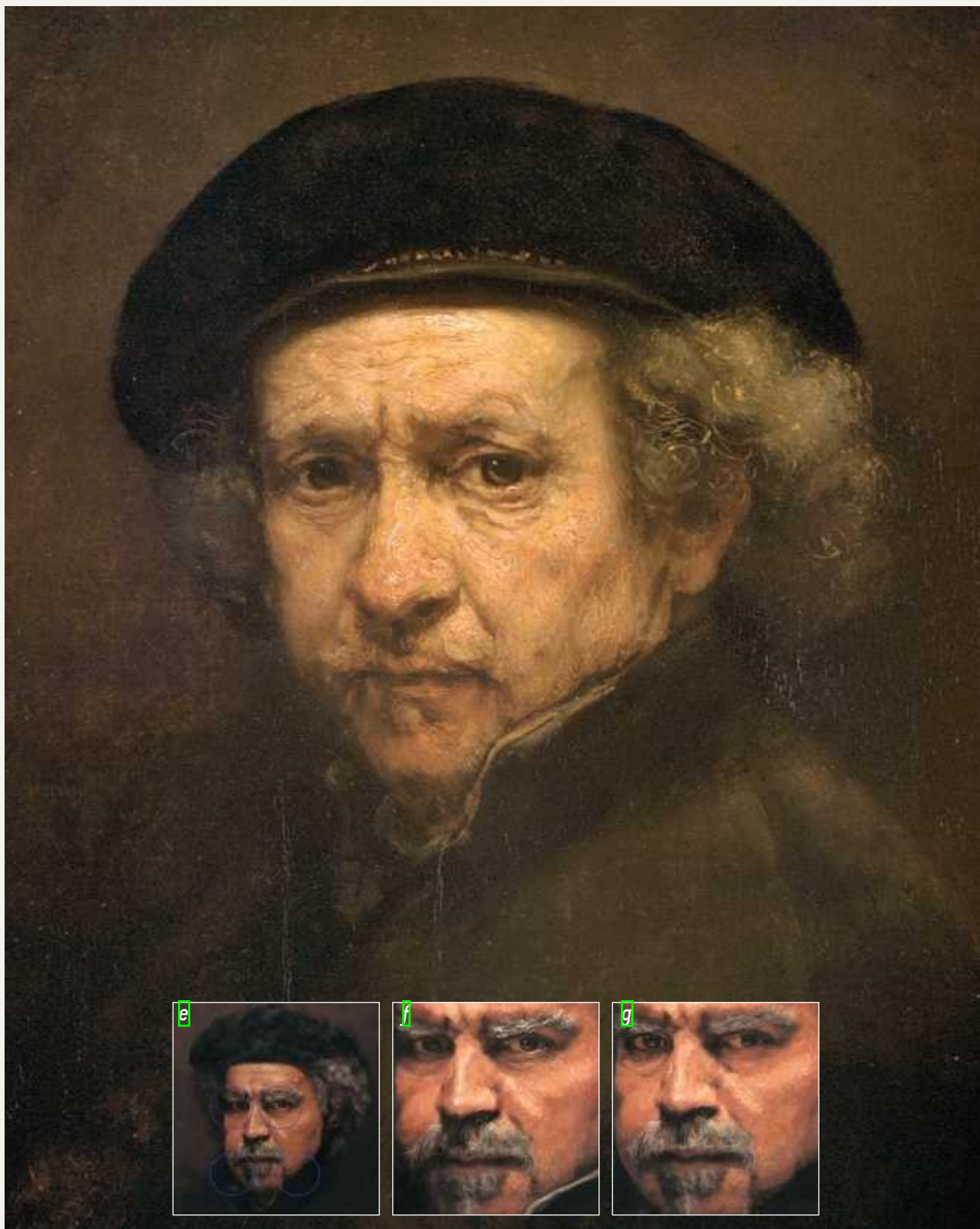
Ces différents portraits, « à la Rembrandt » ou non, ont ensuite été présentés à des spectateurs dont les mouvements oculaires étaient enregistrés avec des caméras ultrarapides. Qu'ont révélé ces instruments ?

Face à un portrait reproduisant la technique du peintre, les yeux atteignent plus rapidement la zone riche en détails qu'avec une photo uniformément accentuée. De plus, une fois cette zone précise perçue, l'œil s'y

attarde beaucoup plus longuement qu'ailleurs, ralentissant la succession de saccades : le regard se pose. En outre, la transition de zones au contraste marqué vers celles moins tranchées guiderait le regard à travers le portrait. On parle de technique aux « bords perdus et retrouvés ». De plus, les observateurs ont préféré les portraits où leur regard est pris en charge plutôt que les photographies uniformes. L'emploi de tex-

tures différentes selon les régions du tableau est peut-être un des secrets du plus célèbre des peintres du XVII^e siècle. Rembrandt a probablement développé cette technique par tâtonnements, en suivant son intuition, et peut-être en réfléchissant aux mouvements de ses propres yeux. Néanmoins, l'examen d'autres tableaux montre que l'adoption du procédé a été progressive. En effet, un de ses autoportraits, peint en 1929, est uniforme et détaillé de la même façon quelle que soit la région. À l'inverse, sur un autoportrait plus tardif daté de 1661, les textures varient.

S. Di Paola et al., *Rembrandt's textural agency: A shared perspective in visual art and science*, dans *Leonardo*, MIT Press, à paraître, 2010.



IDÉES DE PHYSIQUE

Une tornade réfrigérante : le tube à vortex

Une tornade d'air créée le long d'un tube permet de séparer l'air chaud de l'air froid. Un effet qui reste encore un peu mystérieux.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Un gilet réfrigérant, qui utilise juste de l'air comprimé, pour ouvriers travaillant au chalumeau ? Cela existe. C'est l'une des applications du tube de Ranque-Hilsch, aussi nommé tube à vortex. Il s'agit d'un petit réfrigérateur sans pièce mobile ni échangeur de chaleur, qui fonctionne avec de l'air comprimé à température ambiante. Ce dispositif crée un flux d'air froid et un flux d'air chaud, dont la différence de température peut atteindre 200 °C ! Le tube à vortex a des applications industrielles ; et pourtant, son fonctionnement reste mal compris et semble même violer une loi physique fondamentale.

perpendiculaire à l'axe du cylindre et tangente à sa circonférence [voir la figure 1]. Il se crée alors une véritable tornade interne dont la vitesse de rotation atteint un million de tours par minute. À mesure que l'air se détend dans le tube, la pression chute rapidement à une valeur proche de la pression atmosphérique et l'air accélère jusqu'à des vitesses proches de celle du son. L'ac-

tion de la force centrifuge concentre alors l'écoulement au voisinage des parois du tube.

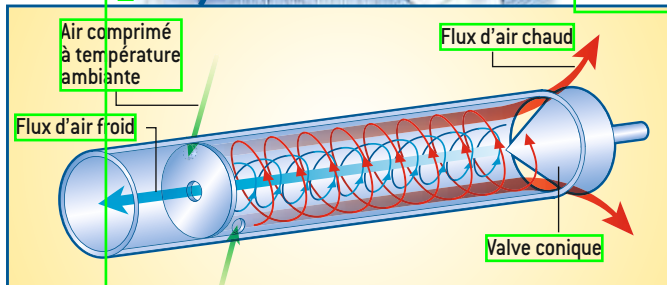
Séparer les températures

Arrivé à l'extrémité du tube, la partie externe de l'écoulement s'échappe à travers une valve conique, dont on ajuste l'enfoncement pour régler le débit sortant (typiquement 30 à 70 pour cent du débit initial). Quant à la partie interne du flux, elle rebondit sur le cône et s'écoule en sens inverse, au voisinage de l'axe du tube. Cet air s'échappe par une petite ouverture pratiquée au niveau de la zone d'injection, sur l'axe du tube. En régime permanent, on constate que l'air « périphérique », qui sort du côté de la valve, est plus chaud que l'air « axial », qui émerge de l'autre côté (dans une autre version du tube à vortex, l'échappement de l'air froid se fait du même côté que l'air chaud, par un trou central percé dans la valve).

Un dispositif simple

Cela fait près de 80 ans que le métallurgiste et physicien français Georges Ranque, qui a déposé un brevet en 1932, a inventé un peu par hasard le tube à vortex. Ce dispositif était tellement incroyable qu'à l'époque, les scientifiques et les ingénieurs n'y ont pas cru. Il serait resté dans l'oubli si, après la Seconde Guerre mondiale, l'ingénieur allemand Rudolf Hilsch ne l'avait étudié en détail et amélioré ses performances.

Ce réfrigérateur se présente sous la forme d'un simple tube de longueur 30 à 50 fois supérieure à son diamètre. À l'une de ses extrémités, on injecte de l'air comprimé, à quelques atmosphères, avec une vitesse



1. EN INJECTANT DE L'AIR COMPRIMÉ dans un tube à vortex, ou tube de Ranque-Hilsch, on obtient un jet d'air chaud et un jet d'air froid, ce dernier servant par exemple à refroidir des pièces usinées par une machine-outil. Dans un tel tube, l'air est injecté de façon à créer un tourbillon ou vortex, qui progresse le long du tube. La partie périphérique du tourbillon s'échauffe et sort du tube grâce à une valve conique, tandis que la partie plus interne du flux d'air se refroidit, est bloquée par la partie centrale de la valve, repart dans l'autre sens et émerge par un trou circulaire percé dans la cloison, près des points d'injection.

Les performances du tube à vortex sont spectaculaires : la différence de température entre l'air chaud et l'air froid est de l'ordre de 150 °C. En pratique, le flux d'air froid peut atteindre -40 °C, et celui d'air chaud, dans un autre régime de fonctionnement, va jusqu'à environ 190 °C !

De prime abord, un physicien ne peut être que déconcerté par un comportement qui semble violer l'un des principes de la thermodynamique. Car si l'uniformisation des tem-



2. EN MILIEU INDUSTRIEL, où l'air comprimé est aisément disponible, les ouvriers confrontés à des températures élevées peuvent être équipés d'une combinaison refroidie à l'aide d'un tube à vortex.

Températures d'un corps chaud mis en contact avec un corps froid nous est familière, nul n'a jamais vu des différences de température apparaître spontanément au sein d'un corps de température initiale uniforme !

En réalité, le processus n'a ici rien de spontané. Les flux d'air chaud et froid s'échappent du tube à vortex à une pression proche de la pression atmosphérique, tandis que l'air injecté l'est à une pression de plusieurs atmosphères (entre deux et huit environ). En d'autres termes, le dispositif ne fonctionne que parce que l'on a préalablement comprimé l'air, donc fourni un travail.

Le tube à vortex apparaît alors pour ce qu'il est vraiment : un réfrigérateur (ou une pompe à chaleur) qui prélève de l'énergie à l'air froid pour la transférer à l'air chaud, grâce à un apport extérieur d'énergie. De ce point de vue, le tube à vortex est d'une efficacité médiocre : sa puissance de réfrigération (jusqu'à trois kilowatts quand même) atteint à peine le cinquième de la puissance fournie, alors que les machines thermiques ordinaires arrivent à échanger trois fois plus d'énergie que celle fournie.

Toutefois, les économies d'énergie ne sont pas tout et le tube à vortex a prouvé

son intérêt dans l'industrie : simple, compact, léger, silencieux, il n'utilise pas de fluide réfrigérant (et polluant). Il n'y a aucune pièce mobile, d'où un entretien réduit ; pas d'électricité, donc moins de risques d'étincelles. L'air comprimé étant aisément disponible en milieu industriel, le tube de Ranque-Hilsch est très commode pour refroidir des dispositifs électroniques, des machines-outils en fonctionnement ou la combinaison d'ouvriers soumis à des températures extrêmes (voir les figures 1 et 2).

Un mécanisme pas totalement élucidé

Comment une différence de température naît-elle dans le tube à vortex ? Le refroidissement dû à la détente de l'air n'est pas suffisant pour expliquer l'effet : on n'atteint pas $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ en laissant de l'air sous pression s'échapper d'un tuyau. En outre, des expériences ont montré un effet du même type avec de l'eau. L'explication du phénomène fait l'objet d'âpres discussions entre physiciens.

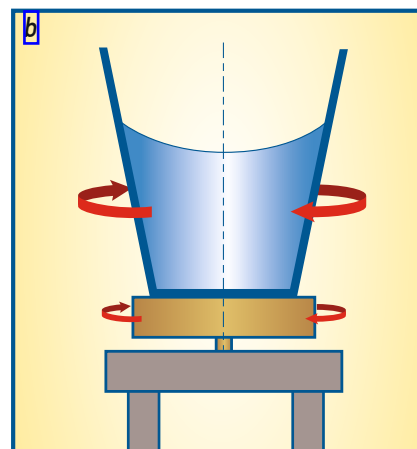
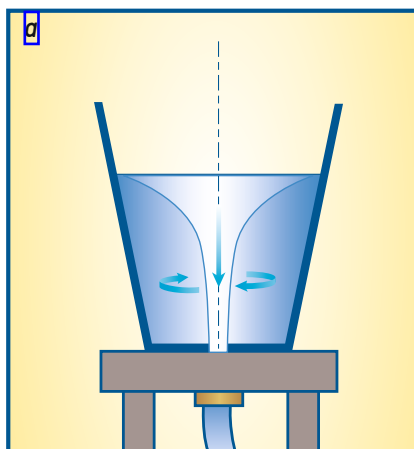
Pourquoi cette difficulté ? La principale raison est que la vitesse de l'écoulement est proche de la vitesse du son. Or cette vitesse macroscopique est du même ordre que les vitesses microscopiques associées

LES AUTEURS



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

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr



3. QUAND UN SEAU REMPLI D'EAU se vide par un trou central percé au fond (a), un tourbillon se forme, la vitesse de rotation de l'eau étant maximale près de l'axe, minimale au niveau des parois. Dans la zone d'injection de l'air comprimé dans un tube à vortex, l'écoulement est analogue. À l'autre extrémité du tube, l'écoulement ressemble plus à celui de l'eau d'un seau mis en rotation constante autour de son axe (b), où l'eau tourne en bloc, c'est-à-dire avec une vitesse angulaire uniforme, la vitesse de translation du fluide étant maximale au niveau de la paroi et nulle au niveau de l'axe.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Eiamsa-ard et P. Promvongse,
Review of Ranque-Hilsch
effects in vortex tubes,
*Renewable and Sustainable
Energy Reviews*, vol. 12(7),
pp. 1822-1842, 2008.

A. Gutsol et J. A. Bakke,
A new vortex method of plasma
insulation and explanation
of the Ranque effect,
*Journal of Physics D : Applied
Physics*, vol. 31(6),
pp. 704-711, 1998.

à l'agitation thermique à température ambiante, c'est-à-dire les vitesses désordonnées des molécules dans l'air ambiant. L'analyse de l'effet Ranque-Hilsch doit donc prendre en compte tant les effets macroscopiques d'écoulement que les phénomènes microscopiques. L'étude est rendue plus délicate encore par le fait que l'écoulement est complexe et fortement turbulent.

Toutefois, l'un des scénarios possibles, avancé en 1997 par le physicien russe Alexander Gutsol, est le suivant. À l'entrée du tube, les molécules injectées sont vite entraînées dans un mouvement tourbillonnaire. Dans ce gaz en rotation, les molécules dont les vitesses tangentielles sont les plus faibles subissent une force centrifuge moins intense que les autres. Ces molécules tendent donc à se rappro-

cher de l'axe, tandis que les plus rapides sont au contraire poussées vers les parois du tube. À mesure que l'air avance le long du tube, les molécules se séparent donc en fonction de leurs énergies cinétiques : les plus rapides (les plus chaudes) se retrouvent sur la périphérie et les plus lentes (les plus froides) vers l'axe.

En sortie de tube, on obtient ainsi un mouvement de rotation d'ensemble, un écoulement où l'air tourne en bloc comme de l'eau dans un seau mis en rotation autour de son axe (voir la figure 3). Le frottement sur les parois décélère quelque peu le fluide périphérique et le réchauffe, tandis que l'expansion du fluide central dans le vide relatif régnant près de l'axe le refroidit. Ce scénario est plausible, mais est-il le bon ? L'avenir nous le dira... peut-être.



Ce livre est un recueil des articles que l'auteur a publiés dans la rubrique Art et pathologies du magazine *Cerveau & Psycho*.

Dans cet ouvrage, l'auteur s'interroge sur les liens cachés entre une œuvre d'art – une peinture, une sculpture, une composition musicale ou une œuvre littéraire – et une maladie de l'esprit que présentait son auteur.

Examinant divers chefs-d'œuvre avec un regard de psychologue, neurologue, voire psychiatre, Sebastian Dieguez analyse plus d'une vingtaine d'œuvres (Dostoïevski, Maupassant, Monet, Ravel, De Chirico, Proust, Van Gogh....).

075101 • 176 pages • 25 euros

Disponible en librairie ou sur www.pourlascience.fr



le collège **universcience**

à la Cité des sciences et de l'industrie
universcience.fr

Conférences

Le mercredi
à 18 h 30

Nouvelle Terre en vue ?

—

6 octobre

**De la vie dans le Système solaire ?
Le cas de Mars**

—

13 octobre

**La vie a-t-elle pu apparaître ailleurs
que sur Terre ?**

—

20 octobre

**La recherche de planètes analogues
à la Terre**

—

27 octobre

La diversité des systèmes planétaires

Les entretiens universcience

Moment de réflexion publique sur la science contemporaine, les **entretiens universcience** sont des «cartes blanches» données à de grandes figures de la recherche internationale. Ces rencontres sont construites à partir d'une «conversation» où l'invité se prête au dialogue fécond avec deux «répondants» eux-mêmes engagés dans l'aventure de la recherche.

Samedi 9 octobre à 10 h 30 **L'Univers et soi-même**

Avec **George F. Smoot**, Prix Nobel de physique 2006 pour ses travaux sur le fond diffus cosmologique, professeur à l'université Paris-Diderot Paris-VII, titulaire de la chaire internationale Blaise-Pascal qui nous présentera ses recherches liées au développement des futures missions spatiales en cosmologie.

http://www.apc.univ-paris7.fr/APC_CS/

Avec le soutien de

SCIENCE

FUTURA - SCIENCES

DE L'ESPACE

ENCYCLO



SCIENCE & GASTRONOMIE

La lumière gâte-t-elle les légumes ?

L'exposition à la lumière des étalages augmenterait plutôt la concentration en vitamines des aliments, mais les études devraient inclure les modifications du goût.

Hervé THIS



Les magasins d'alimentation font souvent valoir les primeurs par des éclairages fluorescents... Le stockage prolongé à la lumière endommage-t-il les composés des tissus végétaux ? Les chlorophylles, par exemple, perdraient leur atome central de magnésium et se transformeraient en « phéophytines » (qui donnent la couleur vert olive des haricots verts trop cuits), si elles n'étaient associées à des caroténoïdes : ces pigments, à l'origine de la couleur des carottes, comportent des doubles liaisons « conjuguées » qui absorbent l'énergie lumineuse, ce qui préserve les chlorophylles.

Et les caroténoïdes eux-mêmes : ne sont-ils pas dégradés ? Et les vitamines ? La question doit être dans l'air, car deux études bien différentes viennent d'être publiées. D'une part, Gene Lester et ses collègues du Centre agronomique du Texas ont montré que les craintes suscitées par une exposition prolongée à la lumière des magasins ne sont pas fondées... au moins pour certains composés. D'autre part, Victor Rodov et ses collègues de l'Organisation israélienne agronomique ont observé que les rayonnements ultraviolets stimulent l'accumulation de composés phénoliques dans les oignons pelés, ce qui prévient l'attaque par des micro-organismes.

Ces découvertes sont-elles essentielles ? Les faits, d'abord. G. Lester et ses collègues texans ont utilisé des feuilles d'épinard fraîches, jeunes ou plus âgées, de deux variétés et à divers stades de développement, qu'ils ont, soit placées dans l'obscurité, soit exposées à la lumière, dans les conditions de la vente de ces produits. Les expériences ont

duré neuf jours, pendant lesquels différents paramètres, dont les concentrations en vitamines, ont été mesurés.

D'après ces critères, la lumière des magasins serait plutôt bénéfique : toutes les feuilles stockées à la lumière pendant au moins trois jours avaient des concentrations significativement supérieures en vitamines. Toutefois, la vitamine C diminuait, après six jours, revenant à sa concentration initiale après neuf jours. Bilan positif ? Pas sûr : les feuilles éclairées en permanence étaient davantage flétries, de sorte que si la qualité nutritionnelle augmente lors de l'exposition prolongée à la lumière, l'attrait du produit diminue.

Les agrochimistes israéliens se sont plutôt intéressés aux qualités nutritionnelles des aliments après la récolte. Pour préciser l'effet des ultraviolets, les chimistes israéliens ont testé des oignons bruns dont ils ont analysé les concentrations en composés phénoliques protecteurs, notamment en flavonol : le contenu de ce dernier augmentait régulièrement. L'exposition réduisait aussi l'attaque par des *Penicillium* injectés, sans l'éviter entièrement : 30 pour cent des bulbes exposés aux ultraviolets avaient résisté, contre 10 pour cent seulement pour les bulbes non exposés. Les ultraviolets ne peuvent, à eux seuls, protéger des bulbes contaminés.

Que conclure ? Ces études sont très préliminaires et rudimentaires, malgré les déclarations triomphalistes de leurs auteurs. G. Lester, par exemple, écrit que « les découvertes faites lors de cette étude révèlent que les feuilles d'épinard exposées à des lumières continues de magasin, à la température de 4 °C, dans des emballages transparents, sont globalement plus denses nutritionnel-

lement [enrichies] que les feuilles conservées dans l'obscurité ». C'est exagéré ! Seuls quelques composés ont été testés, et si les vitamines sont effectivement des composés indispensables, ils ne peuvent à eux seuls résumer la qualité nutritionnelle des épinards. Dans le cas des oignons, les auteurs évoquent aussi une amélioration de la qualité nutritionnelle et microbiologique.

Surtout, dans le premier cas, les auteurs n'ont pas fait état de la dégradation des chlorophylles, même s'ils ont admis un flétrissement supérieur. Et puis, ceux qui ont déjà mangé des petits pois juste cueillis, des salades dont le pied coupé laisse encore perler un lait de fraîcheur, ne seront pas prêts à supporter des végétaux stockés pendant neuf jours, lumière ou pas ! Oui, les chimistes israéliens peuvent déclarer que « les oignons pré-découpés pourraient bénéficier des traitements aux rayonnements ultraviolets », mais est-il si pénible de couper un oignon au moment de le cuire ? Dans nos sociétés d'abondance où la diversité proposée évite des carences vitaminiques, c'est plutôt le goût des aliments qui est essentiel : c'est parce que les aliments ont du goût que la satiété s'installe et que nous évitons l'obésité. Or, rien n'a été dit du goût, Graal des cuisiniers !



Hervé THIS dirige l'Équipe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'AgroParisTech. Il est aussi directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Acad. des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

POUR LA SCIENCE

Sélection spéciale Hervé This



Cours de gastronomie moléculaire n°1

Science, technologie et technique... culinaires : quelles relations ?

Hervé This

Les applications de la gastronomie moléculaire proposées par Hervé This se comptent aujourd'hui par centaines. Comment «inventer»? Comment valoriser les résultats scientifiques en vue de l'innovation? Dans ce nouvel ouvrage, l'auteur présente une méthode pratique, simple, efficace pour faire dialoguer science et technologie en vue d'une réconciliation des deux champs.

978-2-7011-5120-5 • 160 pages • 19,00 €



Cours de gastronomie moléculaire n°2

Les précisions culinaires

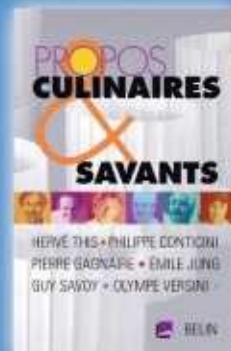
Hervé This

Trucs, astuces, tours de main, proverbes, adages, maximes, dictons... L'auteur a nommé toutes ces idées «précisions culinaires», par opposition aux «définitions» qui sont données dans les recettes. Dans une approche historique et scientifique, l'auteur dissèque notre culture culinaire et n'en garde que le meilleur!

978-2-7011-5475-6 • 272 pages • 19,50 €



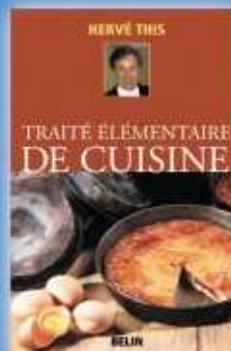
978-2-7011-4974-5 • 232 pages • 21,00 €



978-2-7011-4614-0 • 192 pages • 22,90 €



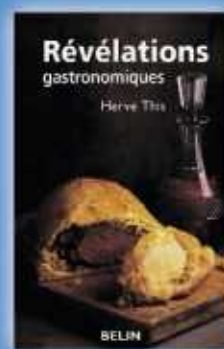
978-2-8424-5039-7 • 240 pages • 23,00 €



978-2-7011-3303-4 • 240 pages • 20,00 €



978-2-8424-5087-8 • 168 pages • 26,00 €



978-2-7011-1756-0 • 320 pages • 21,00 €



Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr



978-2-7011-2309-7 • 132 pages • 15,00 €

→ SANTÉ

Le vrai régime anticancer

David Khayat

Odile Jacob, 2010

[336 pages, 19,50 euros]

Le nombre de cancers augmente au point de devenir la première cause de mortalité prématurée en France. Fort d'une pratique de plus de 30 ans comme chef du Service de cancérologie à la Pitié-Salpêtrière, David Khayat nous invite à revisiter les déterminismes de la cancérogenèse. Le tabac, la génétique, le statut hormonal, certains virus ou la pollution sont des facteurs connus. Mais sait-on que pour 20 pourcent des cancers, la cause est dans notre assiette ?

Après une description des mécanismes régissant la vie cellulaire (promotion ou inhibition de l'expression génique, synthèse protéique, voies de signalisation), l'auteur nous propose une lecture passionnante de l'histoire naturelle du cancer et des causes de l'altération de la machinerie génétique, qui puisent leur origine dans différentes formes d'agression : stress oxydant, agents physiques, mais aussi... une certaine manière de s'alimenter.



La nutriginomique (étude de l'influence de l'alimentation sur l'expression de nos gènes) a pris une ampleur considérable ces dernières années et a permis de confirmer le rôle déterminant de la nutrition dans l'émergence de nombreuses maladies dites « de civilisation », en particulier du cancer. Si nos aliments sont la source des matériaux constitutifs des structures cellulaires et tissulaires, ils le sont aussi de l'organisation intra et intercellulaire : expression ou répression des gènes, protection et réparation par les histones, détoxification par les enzymes, etc. Le mérite de ce livre est de nous expliquer, étape par étape, les processus en jeu. Bien que le sujet soit austère, la lecture de ces pages donne un sentiment de limpidité. Le lecteur naïf comprend et le lecteur averti apprécie la fluidité du propos qui jamais ne gomme la complexité du sujet. L'auteur fait ainsi preuve d'un réel sens de la vulgarisation et d'excellentes qualités pédagogiques.

Plusieurs exemples sont proposés à notre réflexion : le cas du poisson est intéressant puisque sa consommation est préconisée en prévention cardio-vasculaire. Or une étude (Calypso) tempère cet enthousiasme en raison de leur contamination par les métaux lourds, réputés cancérigènes. Mêmes doutes majeurs sur les poissons d'élevage ! Alors, entre deux maux faut-il choisir ? Autre exemple, celui de la viande, diabolisée depuis 30 ans en raison du risque du cancer du côlon. Pourtant, cinq études prospectives récentes comprenant des cohortes de plusieurs milliers de sujets la dédouanent totalement. Alors, nous a-t-on trompés ? Avec l'objectivité qui n'exclut pas la modestie qu'inspirent de vastes domaines d'incertitude, l'auteur nous

entraîne dans un voyage éclectique où il analyse l'impact de différents groupes d'aliments : lait et laitages, pré et probiotiques, œufs, fruits et légumes, matières grasses, sucres, boissons et alcool. Chaque chapitre est l'objet d'une discussion entre certitudes, doutes et hypothèses. Il bouscule au passage bon nombre d'idées reçues partagées par l'opinion publique et une partie du corps médical pour qui la nutrition fait encore partie d'une science « mineure », et fustige les prophètes en tous genres qui se nourrissent de l'angoisse des patients en prétendant les guérir !

Quelles conclusions tirer de cette lecture ? Pour un esprit scientifique (et pour les autres !), qu'il ne faut jamais perdre son sens critique. Face aux idéologies alimentaires, qu'il faut savoir bon sens garder. Et contre les (bonnes ou mauvaises) habitudes alimentaires, qu'il faut s'ouvrir à la diversité. Manger, c'est par essence puiser la vie dans son environnement. Alors, préservons celui-ci et vivons !

Ce livre comprend en annexe une intéressante liste d'aliments à bannir, à recommander ou à consommer avec modération ainsi qu'une importante bibliographie.

→ Bernard Schmitt

Centre hospitalier de Bretagne Sud, CERNh, Lorient

→ BIODIVERSITÉ

Aux sources de notre nourriture

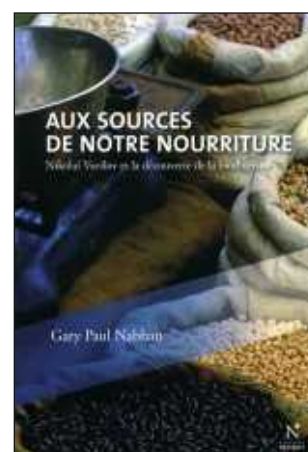
Gary Paul Nabhan

Nevicata, 2010

[304 pages, 23,95 euros]

En cette année internationale de la biodiversité, qui fait beaucoup parler de son érosion et du rythme accéléré

d'extinction des espèces sauvages, quelle bonne idée de rappeler et l'importance de la biodiversité agricole, elle-aussi menacée, et le rôle qu'a joué Nikolai Vavilov (1887-1943), grand botaniste quelque peu oublié, dans la connaissance et la conservation de cette richesse.



C'est l'émergence de cette science incarnée par Vavilov que nous conte de façon fort vivante Gary Paul Nabhan, ethnobiologiste américain. Une histoire marquée ici par deux événements particulièrement dramatiques, l'un qui ouvre le récit, l'autre qui le clôt : nous sommes à l'été 1941, les armées de Hitler se lancent sur l'URSS avec, pour première cible, Leningrad et ses trésors – les richesses artistiques de l'Ermitage, mais aussi les 380 000 échantillons de semences, racines et fruits appartenant à quelque 2 500 cultures vivrières des cinq continents, recueillis depuis 1894 par les chercheurs-explorateurs russes du Bureau de botanique appliquée ; le 26 janvier 1943, après une longue agonie, Vavilov, grand découvreur des origines de notre alimentation et artisan de la lutte contre les famines, meurt de faim dans les geôles de Staline.

Le livre de G. Nabhan se lit comme un roman d'aventure, celui d'un homme remarquable parcourant le monde à la recherche des sources de notre nourriture. Mais c'est d'abord une initiation, d'accès facile, à la science qui s'est développée autour de l'agrobiodiversité. Une science croisant génétique, écologie, phytopathologie, ethnologie et biogéographie et dont Vavilov fut, avec son collègue et ami américain Harry Harlan, l'un des grands fondateurs.

Tous deux se préoccupaient déjà du déclin de la biodiversité agricole, c'est-à-dire de la perte progressive des semences localement adaptées qu'ils savaient être la source même de nouvelles variétés. Pour Vavilov, qui fut marqué enfant par la terrible famine de 1891-1892, la biodiversité agricole est la pierre angulaire de la sécurité alimentaire pour l'humanité. Sans elle, notre système alimentaire risque d'être miné par les sécheresses, inondations, parasites et autres ravageurs, sans oublier le réchauffement climatique et la mondialisation de l'économie.

Pour faire comprendre tout cela, l'auteur nous propose un voyage sur le terrain, dans les pas et avec Vavilov. Vavilov l'explorateur, Vavilov le savant, mais aussi Vavilov le polyglotte et l'ethnobiologiste avant l'heure, qui écoute le paysan, qui apprécie son savoir, qui respecte les pratiques agricoles anciennes développées dans tous les coins du monde. Ainsi le voit-on dans sa première grande expédition de collecte de semences sur le « Toit du monde », au Tadjikistan actuel ; puis au Pamir, dans la plaine du Pô, en Abyssinie, dans la Sierra Madre au Mexique ...

Bref, au cœur de ces « centres de diversité » dont Vavilov fut le

grand découvreur – foyers à partir desquels se développèrent les grandes cultures vivrières du monde.

Lisez ce livre et faites-le lire autour de vous. Parce que mieux connaître ou découvrir Vavilov vous fera du bien. Mais aussi parce que l'histoire des ressources génétiques alimentaires est plus que jamais d'actualité. Parce que, enfin, le récit de G. Nabhan est passionnant.

→ Robert Barbault

Institut d'écologie (CNRS-UPMC) et Muséum national d'histoire naturelle, Paris

→ COSMOLOGIE

Trous noirs

Leonard Susskind

Robert Laffont, 2010, (480 pages, 24 euros).

Cela fait des décennies que les physiciens essayent en vain d'unifier la mécanique quantique et la relativité générale. Pendant longtemps, elles ont toutes deux très bien marché dans leur domaine d'application. Mais voilà qu'en 1976, Stephen Hawking, grand spécialiste de la relativité générale et future « star » de la physique, révéla un conflit potentiel entre ces deux théories. La pierre d'achoppement : les trous noirs.

S. Hawking avait commencé par montrer que ces astres, si compacts que rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper, sont tout sauf éternels : comme le ferait une mare d'eau au soleil, ils s'évaporent. Jusque-là, pas de problème. Mais si un trou noir s'évapore, que devient l'information relative aux objets qu'il engloutit ? Selon la mécanique

quantique, l'information d'un système physique ne peut être perdue. La théorie est catégorique sur ce point. Si une mare d'eau s'évapore, il est en principe possible de reconstruire ses caractéristiques en analysant celles des molécules s'étant échappées. Pourtant Hawking affirma, arguments apparemment impa- rables à l'appui, que l'information absorbée par un trou noir n'est jamais restituée lors de son évaporation. L'Univers perdrait donc de l'information !

Le physicien Leonard Susskind, l'un des pères de la théorie des cordes, fut l'un des premiers à être sincèrement perturbés par ce conflit entre mécanique quantique et relativité générale qu'il découvrait en 1983. Il ne savait pas pourquoi, mais il avait l'intuition que S. Hawking se trompait. Restait à trouver l'erreur de raisonnement. Pendant plus de 20 ans, il batailla avec les arguments de S. Hawking. C'est cette



« querelle » qu'il raconte dans ce livre, en offrant sa vision des choses et en la confrontant à celle des autres protagonistes de l'histoire. Outre son intérêt historique,

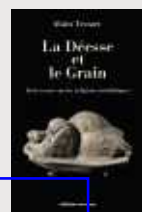
Brèves

LA DÉESEE ET LE GRAIN

Alain Testart

Errance, 2010 (166 pages, 29 euros).

La théorie de la Déesse-Mère suppose un âge mythique de domination des femmes sur la société succédant à l'invention par elles de l'agriculture. L'auteur en démonte les bases, puis critique les interprétations convenues des images laissées par les premières sociétés de paysans. Un bel exercice d'anthropologie sociale.



LES MOUSSES

J. Cantat et al.

Belin, 2010 (278 pages, 35,20 euros).



Très présentes dans notre quotidien, les mousses jouent aussi un rôle dans l'industrie. Ce livre contient la première description complète de leurs propriétés physico-chimiques. Tous ceux qu'elles intéressent ou qui doivent affronter leur rhéologie compliquée y trouveront le moyen de les étudier.

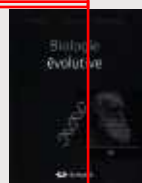
BIOLOGIE ÉVOLUTIVE

Sous la dir. de F. Thomas, T. Lefèvre, M. Raymond

De Boeck, 2010 (814 pages, 89 euros).

L'évolution des espèces n'est pas une théorie, mais une réalité. En revanche,

le domaine d'étude associé, la biologie évolutive, fondé par Darwin, foisonne d'observations et de théories cherchant à explorer cette réalité et à expliquer les processus d'évolution, ainsi que les comportements des espèces. Ce gros ouvrage en offre un remarquable état des lieux destiné avant tout aux étudiants de master et aux chercheurs.



Brèves

MÉDECINE ET PHILOSOPHIE

Anne Fagot-Largeault

PUF, 2010 (288 pages, 28 euros).

Qu'il s'agisse de diagnostiquer une maladie, de choisir une thérapie ou de répondre à la détresse d'une personne, la pratique médicale nécessite constamment d'évaluer des risques, d'être lucide sur les limites de nos connaissances, voire de se confronter à des problèmes moraux – bref, une philosophie de l'acte médical. Cet ouvrage, qui rassemble des articles publiés entre 1978 et 2000, explicite cette philosophie et expose les stratégies mises en place pour aider les médecins dans leur pratique. Les réflexions soulevées sont toujours d'actualité.

BONIFACIO : PORTRAIT D'UNE RÉSERVE NATURELLE



Eric Volto

Kyrnos Publications, 2010 (112 pages, 12,50 euros).

Célébrant les dix ans de la réserve naturelle des Bouches de Bonifacio, ce hors-série de la revue *Stantari* propose, au fil d'un magnifique portfolio commenté, de découvrir la faune et la flore – tant marines que terrestres – de ce petit paradis corse.

AUX ORIGINES DU MONDE

Jean-Pierre Verdet

Seuil, 2010

(232 pages, 19 euros).

Comment est né notre système solaire ? Platon, Descartes, Buffon, Kant, Laplace et bien d'autres ont tenté de répondre à cette question. L'auteur nous livre avec clarté leurs réflexions au fil des siècles et les virulents débats qui les ont jalonnées.

puisqu'il permet de suivre l'évolution d'une controverse scientifique récente, cet ouvrage de vulgarisation scientifique se signale pour ses qualités didactiques (même si, sans entrer dans les équations, la compréhension qu'on peut avoir de théories et concepts très complexes est toute relative).

Quitte à tuer le suspense, disons tout de suite que S. Hawking a perdu cette bataille, du moins il a reconnu sa défaite. Au début des années 2000, L. Susskind a montré avec des collègues que la mécanique quantique n'était pas forcément contredite. Il ressort toutefois que cette victoire, en dépit du triomphalisme de L. Susskind, reste problématique. Les raisonnements victorieux ne sont en effet valables que pour des cas particuliers et se fondent sur des idées très spéculatives (théorie des cordes, principe holographique, etc.). Mais n'est-ce pas ainsi qu'avance bien souvent la physique théorique de nos jours ?

→ Thomas Lepeltier
Université d'Oxford

→ BIOLOGIE

COMPORTEMENTALE

Je t'aide...
moi non plus

Christine Clavien

Vuibert, 2010

(186 pages, 25 Euros)

Sous ce titre humoristique, Christine Clavien traite, sur un plan strictement scientifique, de toutes les facettes et, par suite, des ambiguïtés de l'altruisme. Car le terme n'a pas le même sens selon les disciplines. Certes, dans tous les cas, l'altruisme apparaît comme un « don

de soi » effectué par un être vivant, au détriment de ce qui apparaît comme son intérêt immédiat. Mais l'auteure distingue trois sens différents.

Au sens biologique, l'altruisme est un processus, largement génétique, qui fait qu'un animal peut se sacrifier, pour le bénéfice ultérieur de ses apparentés, donc de ses gènes. Comme, par exemple, les insectes sociaux qui meurent en défendant la colonie. C'est un mécanisme darwinien de sélection aveugle, certes complexe comme le montre l'auteure, mais où n'intervient aucune connotation morale. Des formulations abusives, comme le « gène égoïste », ont créé la plus grande confusion en laissant supposer une morale là où il n'y en a aucune.

Au sens comportemental, l'altruisme est un concept, lui aussi objectif, mais beaucoup plus flou. Il a été beaucoup utilisé en économie, où l'on montre que les hommes font souvent des choix contraires à leurs intérêts rationnels immédiats au profit des intérêts des autres. Mais, dans sa dimension culturelle, le concept peut être appliqué au comportement général des humains ou des animaux, d'autant que des auteurs ont proposé une « sélection culturelle de groupe », parallèle à la sélection génétique darwinienne, et qu'il est probable que « des formes d'altruisme comportemental sont adaptatives ». Par exemple, l'apprentissage social, par enseignement ou par imitation d'un congénère « altruiste », s'avère beaucoup plus rapide et performant que l'apprentissage individuel.



L'altruisme psychologique, enfin, lié à une « motivation dirigée vers le bien », reste très différent de la mécanique aveugle des deux autres sens. En philosophie comme en psychologie, on a pu opposer des thèses égoïstes et des thèses altruistes de l'être humain. Ch. Clavien souligne qu'il paraît difficile de mettre en doute l'existence et « l'efficacité des émotions altruistes ». L'intérêt du livre est finalement de suggérer un lien évolutif entre ces concepts bien différents : « l'adaptabilité de l'altruisme biologique et comportemental semble être une condition nécessaire à l'évolution de l'altruisme psychologique ». Ici encore, les comportements les plus complexes, et notamment ceux de l'homme, tout en gardant leur spécificité, trouvent leurs racines dans des processus biologiques plus élémentaires.

→ Georges Chapouthier

Centre Émotion, CNRS,
Université Pierre et Marie Curie,
Pitié-Salpêtrière, Paris

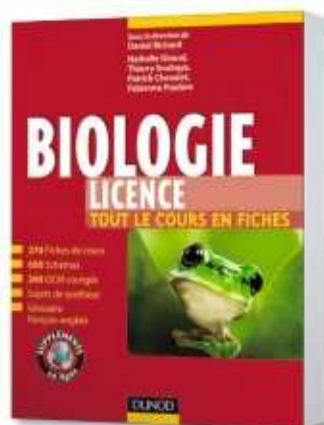


Retrouvez l'intégralité de votre magazine
et plus d'informations sur :
www.pourlascience.fr

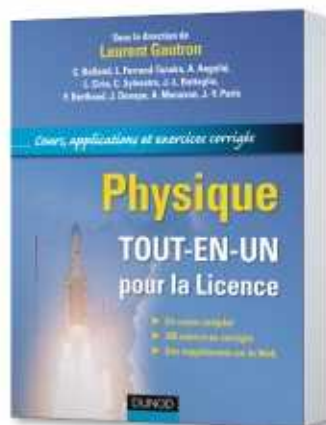
DUNOD, la Référence Universitaire

Les « tout-en-un » des étudiants

UniverSciences



9782100534494



9782100543007



9782100546596

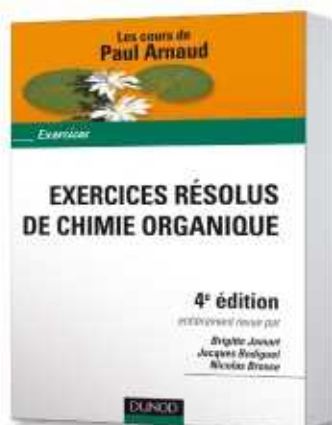


9782100529391

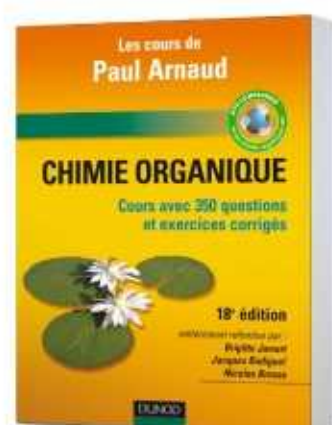
Les ouvrages de référence



9782100513567



9782100546732



9782100526475

Site compagnon de l'étudiant
chimie-organique.net

L'examen dans la poche



9782100516735



9782100525768



9782100538133

Solidarité

Engagement

Proximité

Confiance



casden



BANQUE POPULAIRE

Humaine et contemporaine
notre identité reflète
nos valeurs