

CASSE-TÊTE : comment accrocher un tableau pour qu'il tombe ?

# POUR LA SCIENCE

Juillet 2012 - n° 417

[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

Édition française de Scientific American

## Les **Super** supernovae

### Cinéma des cavernes

Les dessins animés  
de la Préhistoire

### Pourra-t-on guérir du sida ?

Des pistes pour éliminer  
les réservoirs de virus

### Les matériaux autocicatrisants

Des réparations spontanées

La fin  
cataclysmique  
des étoiles  
hypermassives

M 026 07 417 F 6 20 €



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

# La preuve par

# 5

Ritme, distributeur de logiciels scientifiques, fait peau neuve et vous présente sa nouvelle approche avec un positionnement fort sur le service client.

Être leader implique une véritable dimension de service et de conseil que Ritme a déployée depuis de nombreuses années avec pour vocation de faciliter votre métier.

## Faciliter l'accès à une offre logiciel

# 1

toujours plus riche, par une sélection exhaustive et un sourcing de professionnel.

**Faciliter notre relation** en étant réactifs et disponibles. Le site web et notre équipe sont là pour vous.

# 5

# 2

**Faciliter le choix** de la solution la plus appropriée à vos besoins.

**Faciliter le retour sur investissement** par un accompagnement et une traçabilité de vos acquisitions.

# 4

# 3

**Faciliter la prise en main et l'utilisation** de vos logiciels pour en tirer tous les bénéfices.

Cette approche innovante du service alliée à une expertise de distributeur spécialisé confère à Ritme une dimension incontournable dans de nombreux secteurs d'activité.



Découvrez dès maintenant notre nouveau site internet

## [www.ritme.com](http://www.ritme.com)

# RITME

NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE

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

**Groupe POUR LA SCIENCE**

Directrice de la rédaction : Françoise Pétry

**Pour la Science**

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier,

Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

**Dossiers Pour la Science**

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

**Cerveau & Psycho**

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

**L'Essentiel Cerveau & Psycho**

Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot,

Sylvie Sobelmann, Pauline Bilbault, Raphaël Quermel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Yoan Bassinet

Marketing : Élie Abib

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de publication et Gérante : Sylvie Marcé

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro : Stéphane Basa,

Sophie Gallé-Bas, François Gendron, Nicolas Gilbert,

Évelyne Hostalatret, Bénédicte Ménéz, Christophe Pichon,

Pascal Richet, Daniel Tacquenot, Manuel Théry.

**PUBLICITÉ France**

Directeur de la publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja

Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

**SERVICE ABONNEMENTS**

Ginette Bouffé. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

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

Adresse e-mail : [abonnements@pourlascience.fr](mailto:abonnements@pourlascience.fr)

Adresse postale :

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

Commande de livres ou de magazines :

0805 655 255 (numéro vert)

**DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE**

Contact kiosques : À juste titres ; Benjamin Boutonnet

Tel. : 04 88 15 12 41

Canada : Edipresse, 1000 Avenue du Commerce, 1000

Québec, H3N 1V3 Canada.

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

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

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

**SCIENTIFIC AMERICAN** Editor in chief: Mariette DiChristina. Editors: Ricky Rus-

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

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

President : Steven L. Hahn. 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 American, Inc.

La licence d'utilisation 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'ex-

ploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins -

75006 Paris).



de **Françoise Pétry** directrice de la rédaction

## Mouvements cachés

*Si ton œil était plus aïeu, tu verrais tout en mouvement.*

Friedrich Nietzsche

Notre cerveau reconstruit le monde en volume à partir d'images à deux dimensions projetées sur la rétine. De surcroît, ces images ne disparaissent pas instantanément, de sorte que la persistance rétinienne nous permet de voir ce monde en mouvement. Durant la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, plusieurs inventeurs ont compris que des images se succédant à un rythme rapide restituent un mouvement continu, et ont imaginé divers dispositifs précurseurs du cinéma.

La naissance du septième art, ou du moins celle des images animées, est-elle si récente ? Des spécialistes de l'art pariétal en découvrent les prémices dans les peintures des grottes ornées du Paléolithique. Les mouvements de certains animaux, notamment de leurs pattes, sont décomposés comme le seraient ceux destinés à un dessin animé. Et l'on imagine quand même tremblante de leurs torseaux, les artistes des grottes croient voir les bisons et autres lions charger (voir *L'origine préhistorique du cinéma*, page 26).

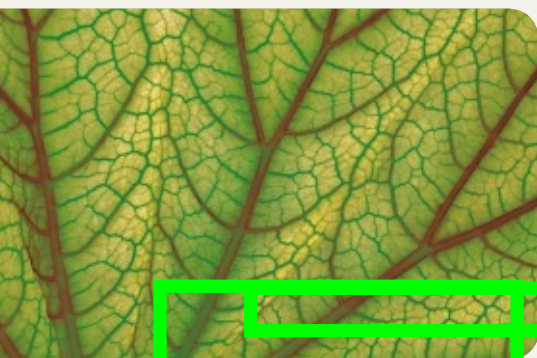
### Et ce n'est pas du cinéma !

L'œil aïeu des historiens voit du mouvement dans des peintures figées. Celle des biologistes le découvre dans le génome des cellules, où se déroulent des séquences d'ADN. Ces éléments mobiles – les rétrotransposons – influeraient sur le fonctionnement des cellules, notamment dans le cerveau. Cela expliquerait en partie pourquoi deux vrais jumeaux, ayant le même patrimoine génétique au moment de leur conception, ne sont jamais identiques (voir *Des gènes sauteurs dans le cerveau*, page 70).

Mouvements cachés aussi, ceux des substances « cicatrisantes » présentes dans les matériaux qui se réparent spontanément. Quand on se blesse, des cellules circulant dans le sang et des facteurs de coagulation sont attirés à l'endroit de la coupure ; les mécanismes de la cicatrisation sont activés. De même, des physiiciens ont imaginé des matériaux autoricatrisants. Ces derniers sont pourvus de « canaliculaires » contenant des réactifs qui se répandent à l'endroit de la « lésion » et la réparent (voir *Les matériaux autoricatrisants*, page 48). Tout mouvement... et ce n'est pas du cinéma !

1 **LE TO**4 **BLOC-NOTES***Didier Nardon*

## Actualités

6 **Comment une cellule se contracte**9 **Une anomalie quantique de l'eau expliquée**10 **Des formules pour les nervures des feuilles**11 **Cristaux et pics volcaniques ... et bien d'autres**12 **ON EN REPARLE**

## Opinions

14 **POINT DE VUE****Une agence de la recherche à transformer***Micèle Neduc et Élisabeth Giacobino*15 **DÉVELOPPEMENT DURABLE****Un écheveau varié pour pêcher durable***Margie-Joëlle Rochet*18 **VRAI OU FAUX****Y a-t-il des « peaux zombiques » ?***Guillaume Jacquemont*19 **COURRIER DES LECTEURS**

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement brochés sur la totalité du tirage, une offre d'abonnement *Pour la Science* p. 17 et une sélection de livres *Pour la Science* en p. 76.  
En couverture : Ron Miller

## A LA UNE

20

ASTROPHYSIQUE

### Super-supernovae

*Avishay Gal-Yam*

Certaines étoiles extrêmement massives finissent leur vie dans des explosions parmi les plus puissantes de l'Univers, déclenchées en partie par la production d'antimatière dans leur cœur.

26

PRÉHISTOIRE

### L'origine préhistorique du cinéma

*Marc Azéma*

Parce qu'ils représentaient des êtres animés des animaux, les artistes de la Préhistoire ont inventé, plus de 35 000 ans avant l'animation cinématographique, les techniques graphiques qui nous sont toujours familières.



DOSSIER IMMUNOLOGIE

### Guérir du sida ?

Pour venir à bout du virus, deux stratégies sont explorées : renforcer le système immunitaire, ou éliminer les réservoirs du virus.

35

### Repousser les attaques du VIH

*Carl June et Bruce Levine*

42

### Éradiquer le VIH : quels obstacles ?

*Ch. Rouzioux, A. Chéret et V. Avettand-Fénoël*

## 48 **SCIENCE DES MATÉRIAUX** **Les matériaux autocicatrisants**

Scott White et al.

Depuis une dizaine d'années, des scientifiques ingénieux mettent au point des matériaux capables de se réparer spontanément en cas de dégât. Plusieurs voies existent pour y parvenir.

## 56 **PHYSIOLOGIE** **Les limites de l'apnée**

Michael Parkes

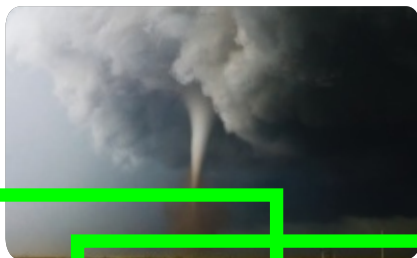
On ne peut retenir longtemps sa respiration. Un mécanisme physiologique oblige à respirer à nouveau, bien avant que le manque d'oxygène ne menace le fonctionnement du cerveau.



## 62 **MÉTÉOROLOGIE** **Tornades : des alertes plus précoces**

Jane Lubchenco et Jack Hayes

Grâce à de nouveaux radars et satellites, il sera possible de mieux anticiper la formation des tornades et ainsi d'épargner de nombreuses vies.



## 70 **NEUROSCIENCES** **Des gènes sauteurs dans le cerveau**

Fred Gage et Alysson Muotri

Comme des vrais jumeaux, élevés de la même façon, peuvent-ils avoir des personnalités différentes ? Des fragments d'ADN qui se déplacent dans le génome des neurones expliqueraient en partie.

## Regards

- 78 **HISTOIRE DES SCIENCES**  
**Poincaré et la rotation  
de la Terre**  
Jean-Marc Ginoux et Christian Gerini  
À l'approche du XX<sup>e</sup> siècle, Henri Poincaré se trouva malgré lui au cœur d'une polémique sur la rotation de la Terre. La presse s'empara de l'affaire...
- 82 **LOGIQUE & CALCUL**  
**L'accrochage des tableaux**  
Jean-Paul Delahaye  
Comment accrocher un tableau avec un clou et une ficelle, de façon à ce qu'en enlevant n'importe lequel des clous le tableau soit libéré et glisse vers le sol ?
- 88 **ART & SCIENCE**  
**Van Gogh  
et les tournesols mutants**  
Loïc Margin
- 90 **IDÉES DE PHYSIQUE**  
**Plus vite que le vent**  
Jean-Michel Courty  
et Édouard Kierlik
- 93 **SCIENCE & GASTRONOMIE**  
**Fus de craie sans préséance**  
Hervé This
- 94 **À LIRE**

Rendez-vous sur

**SCIENCE.fr**

Le site de référence  
de l'actualité scientifique internationale

- **Toutes les sciences en un clic**
  - Des actualités quotidiennes
  - Des articles en libre accès
  - Votre magazine numérique en ligne
  - Plus de 8 ans d'archives\*
- **Des services exclusifs**
  - Les notifications aux articles\*\*
  - Des offres d'emploi scientifiques
  - Des newsletters\*\*
  - Un espace abonnement

\* Service payant. Si vous êtes abonné(e), les numéros compris dans votre abonnement sont offerts.  
\*\* En créant votre compte.

## → JOLIE CHUTE !

Lucien, le jeune homme, participe à un défilé militaire, passe sous les fenêtres d'une jolie femme dont il a capté le regard. À ce moment précis, il tombe de cheval. S'ensuit un éclat de rire que Stendhal qualifie de « général et bruyant ».

Un homme court dans la rue, trébuche et s'étale de tout son long. Bergson trouve cela si amusant qu'il écrit un volume entier consacré au rire.

De Chérot à Hergé, l'art et la manière de se casser la figure ou de laisser échapper un objet qui ne devait surtout pas être brutalisé fournissent une quantité inépuisable de gags.

De toutes les lois de la physique, la gravitation universelle est, de beaucoup, celle qui provoque le plus grand nombre de situations drôles. De tous les physiciens, Newton est, de beaucoup, celui qui est allé le plus loin dans l'analyse des sources du comique.



## → QUESTION DE GÉNÉRATION

Croisez un vieil homme, un vieux, un d'âge moyen et un jeune, il arrive qu'on dise : « Ça doit être le grand-père, le père et le fils. » Cette manière de s'exprimer est incohérente. Désigner le vieux comme le grand-père et l'homme d'âge moyen comme le père, c'est prendre le jeune comme référence. En bonne logique, alors, désigner le jeune comme le fils signifie qu'il est le fils du jeune !

Les formulations cohérentes ne manqueraient pourtant pas. On peut partir de l'homme d'âge moyen, et dire : « Ça doit être un homme, son père et son fils. » On peut partir du jeune : « Ça doit être un homme, son père et son grand-père. » On peut partir du vieux : « Ça doit être un homme, son fils et son petit-fils » ou, de façon laïante : « Ça doit être un homme, son fils et son fils » [comprendre : un homme, son fils et le fils du fils].

Seulement, il est plat de déclarer qu'un des hommes qu'on a croisés est un homme. Nous préférons l'incohérence à la platitude. Les lois du style nous importent plus que celles de la logique.

## → QUELQUES QUANQUANS !

Les équations de la mécanique quantique ont les qualités adéquat pour quantifier des quantités qu'on peut qualifier de quasi imperceptibles.

Cette phrase ne figure pas ici pour son modeste rapport à la physique, mais en tant qu'exemple des incohérences du français. Dans certains mots, le groupe « qua » se prononce « ka » ; dans d'autres, il se prononce « koua » ; dans d'autres encore, l'usage varie selon les locuteurs. De même, le groupe « quan » oscille entre « kan » et « koua ».

Le phénomène semble ne s'expliquer ni par une règle phonétique ni par l'étymologie. « Équateur » et « équarrir » n'induisent pas la même prononciation, quoique ces mots proviennent du latin et soient de sonorités proches. De même, « quator » et « quatrain ».

Les sciences font grand usage de mots contenant « qua » : quadrature, quartique, quadrilatère, quadratique, quadrilatre, quadrante, quasar, quaternaire, quasicristal, quantum, quantificateur, quaternion... Selon une pensée se montrant incapable de décider, il serait bon qu'une commission scientifique internationale tranche, et dise une fois pour toutes comment prononcer.

## → L'EFFET PAPILLON SUR LE NEZ

« À cause du nez, le cheval a trébuché. À cause du cheval, le général a chuté. À cause du général, la bataille a été perdue. À cause de la bataille, l'empire est tombé. » L'ancienneté de cette histoire prouve-t-elle que l'effet papillon est repéré depuis longtemps ? Non, répondent certains observateurs subtils : l'effet papillon doit être inséré dans le cadre de la récente théorie du chaos, au sein de laquelle il prend un sens inconcevable avant ; il symbolise l'imprédictibilité intrinsèque de toute chose, de l'échelle quantique à l'échelle astronomique ; sa portée est sans commune mesure avec celle du dicton « Petite cause, grands effets » qu'illustre le clou faisant tomber un empire.

Ces observateurs subtils ont la même réaction à propos du principe de précaution. Il leur faut d'y voir la simple actualisation du principe *non nocere* médical ou du parapluie couvert par les bureaucrates pour se couvrir. Ils établissent des distinguos entre prudence, prévention et précaution, et replacent la notion de précaution dans la



solennelle problématique de l'éthique. Ils voient le principe de précaution comme la réponse à une question nouvelle : comment agir dans un monde où les concepts de vérité et de certitude scientifiques sont la proie de difficultés sans précédent ?

Méfions-nous de la subtilité. Elle sait dire à chacun ce qu'il a envie d'entendre. Beaucoup, enthousiasmés à l'idée que notre époque apporte du jamais vu, élaborent des arguments prouvant que cette idée est vraie. Les termes

pas tous les conceptions neuves. À en croire Pascal, la longueur du nez de Cléopâtre eut quelque effet sur la face du monde. Les battements des ailes de papillons n'en ont pas plus.

## → FIN STRATÉGIES

Quelques affaires sont en cours, dans laquelle vous n'êtes a priori pas impliqués. Néanmoins, vous avez une opinion quant à l'issue souhaitable de cette affaire. Doutez-vous intervenir ?

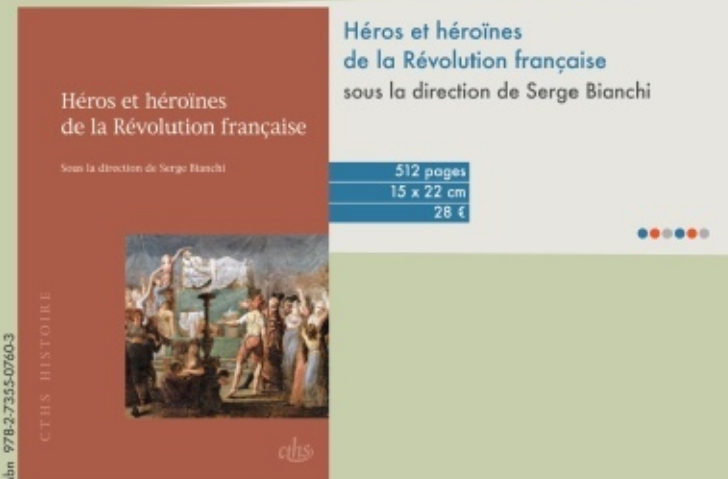
Peut-être, peut-être pas. Lorsque vous cherchez à influencer des gens, vous ne savez pas si ceux qui se laisseront convaincre seront plus ou moins nombreux que ceux qui se rebifferont – soit par esprit de contradiction, soit pour (se) prouver qu'ils sont libres, soit que, interprétant vos arguments d'une toute autre façon que vous, ils les retournent contre vous. Personne ne peut anticiper à coup sûr les suites d'une intervention dans le fouillis des interactions. On voit, par exemple, des personnalités visées par des campagnes de diabolisation renverser ces dernières en leur faveur. Bref, puisque vous n'êtes pas devin, le modèle *a priori* le moins biaisé est l'équiprobabilité : votre intervention a une chance sur trois d'avoir l'effet escompté, une sur trois d'avoir un effet contraire, une sur trois de se perdre dans les sables.

Aucune loi générale n'étant là pour guider, c'est votre caractère qui décidera. Certains ne peuvent s'empêcher d'intervenir en permanence. D'autres laissent tout faire sans réagir. Et tous ont également raison. Donc tous ont également tort. ■



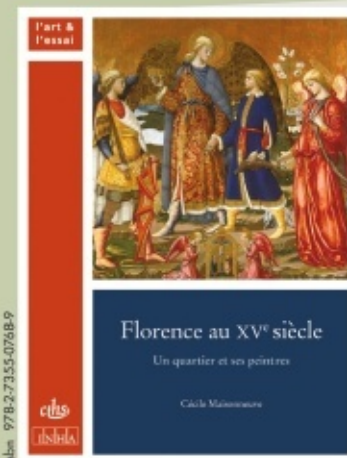
# Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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



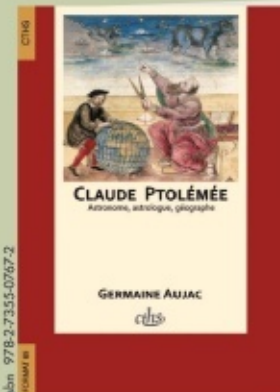
Héros et héroïnes  
de la Révolution française  
sous la direction de Serge Bianchi

512 pages  
15 x 22 cm  
28 €



Florence au XV<sup>e</sup> siècle  
Un quartier et ses peintres  
Cécile Maisonneuve  
coédition CTHS-INHA

320 pages  
16,5 x 22 cm  
ill. couleur et n. et b.  
34 €



Claude Ptolémée  
Astronome, astrologue, géographe  
Germaine Aujac

432 pages  
12 x 18,5 cm  
15 €

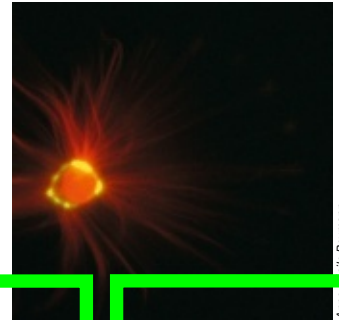
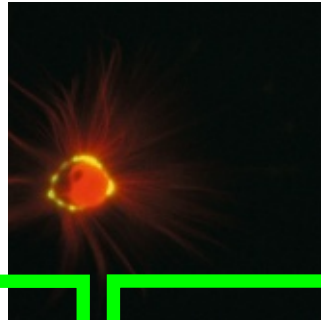
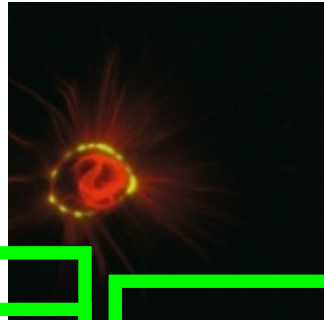
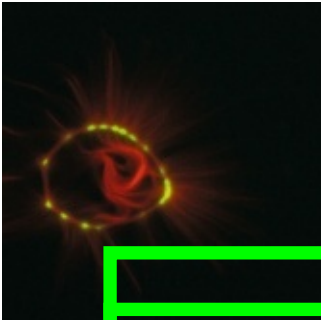
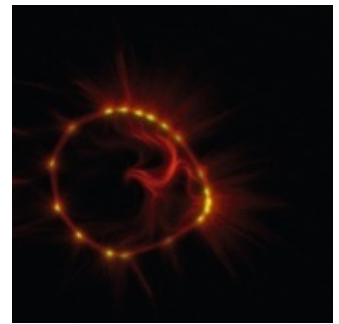
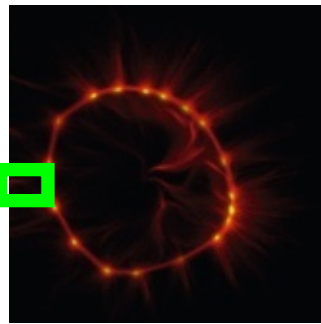
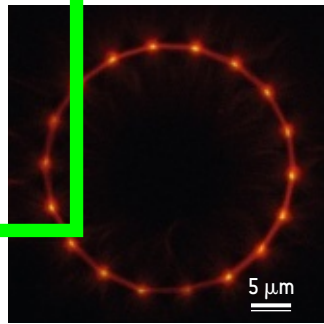
\* ventes@cths.fr \* vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr \* Distribution SCOPIS

## Biophysique

### Comment une cellule se contracte

Une équipe franco-américaine a caractérisé l'architecture et la dynamique des réseaux de filaments d'actine qui, en interaction avec d'autres protéines, contractent la cellule.

Cet anneau est formé de deux types de réseaux de filaments d'actine : des réseaux à filaments entrecroisés (*points rouges*), reliés par des réseaux de filaments antiparallèles. En présence de myosine (*en jaune*), l'anneau se contracte (en 12 minutes) : les filaments se déplacent les uns par rapport aux autres, puis se désassemblent, les deux types de réseaux se déformant à des vitesses différentes.



Anne-Cécile Reymann

L'actine et la myosine sont des protéines essentielles à la contraction, des muscles notamment, mais on ignore comment elles fonctionnent réellement. Anne-Cécile Reymann et ses collègues, de l'Institut de recherche en technologies et sciences pour le vivant (CNRS/UJF/INRA/CEA), à Grenoble, et de l'Université Yale, viennent cependant de franchir un pas important vers la compréhension des mécanismes en jeu. Cette équipe a montré que l'architecture des réseaux d'actine contrôle l'activité des myosines et a modélisé les forces de contraction mises en jeu.

Qu'est-ce qui fait qu'une cellule se contracte dans telle direction et pas dans une autre ? Le squelette protéique – ou cytosquelette – des cellules engendre des forces et des contraintes qui permettent aux cellules de changer de forme ou de se diviser. Ce cyto-

squelette est constitué de plusieurs fibres, les plus abondantes étant les filaments d'actine, des assemblages de plusieurs molécules d'actine.

Les filaments d'actine s'organisent en réseaux qui sont dynamiques et changent de forme selon les contraintes internes et externes, notamment grâce à des protéines agissant comme des « moteurs » moléculaires : les myosines, nécessaires à la contraction des réseaux d'actine. Mais on ignore comment sont organisés les filaments d'actine et comment ils interagissent avec la myosine pour que leur dynamique et leur interaction aboutissent à une contraction.

Les filaments d'actine sont des polymères orientés qui peuvent prendre trois configurations : soit les filaments d'un réseau sont dans le même sens – ils sont parallèles –, soit ils sont antiparallèles (tête-tête), soit ils sont entrecroisés formant un réseau dense. Leur interaction avec les myosines a pour effet de déplacer les filaments d'ac-

tine les uns par rapport aux autres et ainsi de déformer la structure.

Dans une cellule, il est impossible d'étudier les différentes configurations de l'actine et de comprendre comment elles interagissent avec les myosines. Les chercheurs ont donc mis au point un modèle simplifié, *in vitro*, de cytosquelette où les divers types d'organisation des filaments d'actines sont isolés et facilement identifiables et observables, les molécules d'actine y ayant été rendues fluorescentes.

A.-C. Reymann et ses collègues ont constaté qu'en présence de myosine, les structures d'actine composées de filaments antiparallèles se contractent rapidement : elles sont déformées, puis leurs filaments se désassemblent. Les réseaux entrecroisés se contractent aussi, mais plus lentement. En revanche, les réseaux de filaments parallèles d'actine ne se défor-

ment pas et restent sur les différentes configurations d'actine.

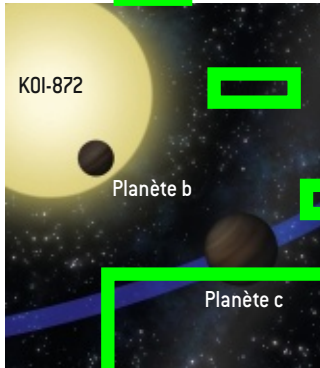
Ces différences permettent de comprendre que la vitesse et l'amplitude de contraction d'une cellule sont très variables : ces grandeurs dépendent de la proportion de filaments d'actine organisés de façon antiparallèle et parallèle, les réseaux antiparallèles d'actine interagissant aux myosines, les autres non. Les chercheurs ont aussi modélisé l'équilibre mécanique contrôlant la dynamique de contraction de ces architectures simples d'actine et de myosine. Ils espèrent ainsi comprendre quelles forces sont mises en œuvre dans les cellules, lors du développement embryonnaire par exemple, ou de dysfonctionnements mécaniques présents dans certaines pathologies.

➔ **Bénédicte Salthun-Lassalle**

A.-C. Reymann et al., *Science*, 2012, 13 juin 2012

## Astrophysique

## Quand une exoplanète en trahit une autre



On a montré l'existence de la planète KOI-872 c grâce aux perturbations gravitationnelles qu'elle exerce sur l'orbite de la planète KOI-872 b.

En 2009, le satellite *Kepler* traque les planètes extrasolaires (ou exoplanètes). Il détecte leurs transits, c'est-à-dire leurs passages devant leur étoile, qui se traduisent par une légère baisse de luminosité de l'étoile. L'une des planètes détectées a intrigué les astronomes, car la durée de ses transits varie. Une équipe menée par David Nesvorný, de l'Institut de Recherche Sciences de l'Université de l'Ohio, a montré que les variations sont dues à l'influence gravitationnelle d'une deuxième planète. Celle-ci aurait une masse proche de celle de Saturne et tournerait autour de son étoile en 57 jours.

C'est la première fois que l'on détecte une exoplanète grâce aux perturbations qu'elle exerce sur une voisine – elle-même n'est pas détectable par transit, car elle ne passe pas devant le disque de son étoile. En revanche, cette méthode a déjà été utilisée pour détecter des planètes. Il y a plus de 150 ans, l'astronome français Urbain Le Verrier a prédit l'existence et la position de Neptune à partir de perturbations dans l'orbite d'Uranus.

→ Guillaume Jacquemont

D. Nesvorný et al., *Scienceexpress*, en ligne, 10 mai 2012

## SA PROPODES À PLEIN GAZ

Les dinosaures, par leurs flatulences, émettent du méthane, produit par des bactéries hébergées dans leur tube digestif. Selon des paléontologistes anglais, les sauroptiles, des dinosaures géants qui vivaient il y a 150 millions d'années, rejetaient ainsi 520 millions de tonnes de méthane par an. Ce chiffre est comparable à l'ensemble des émissions naturelles et anthropiques actuelles. Le méthane étant un puissant gaz à effet de serre, ces émissions auraient réchauffé le climat au Jurassique.

## LE GÉNOME DE LA TOMATE

Un consortium international a séquencé le génome de la tomate (de la variété Heinz 1706) et celui de son parent sauvage, *Solanum pennellifolium*. Ces génomes comportent environ 35 000 gènes et ne diffèrent que de 0,6 pour cent. Leur connaissance permettra notamment de repérer les gènes sélectionnés par la domestication de la tomate, ce qui permettra la mise au point de variétés plus goûteuses ou plus résistantes aux maladies.

## LES ROCHERS BALADEURS

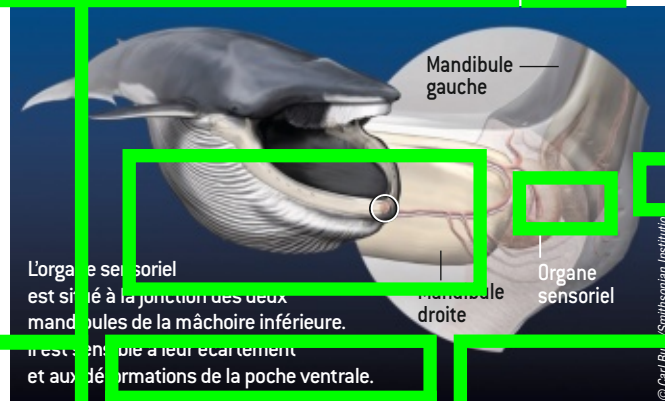
Sur les trois îles d'Aran, en Irlande, d'énormes blocs de pierre de plusieurs dizaines de tonnes forment des empilements jusqu'à 250 mètres à l'intérieur des forêts. Des relevés photographiques entre 2006 et 2011 montrent que les rochers continuent d'être déplacés. Par des tsunamis ? Non. La géologue Rónadh Côté et ses collègues concluent que des vagues de tempêtes sont responsables. Elles bénéficieraient d'effets d'amplification liés à la forme abrupte du rivage.

## Zoologie

## Des baleines au menton sensible

Certaines baleines à fanons engoutissent quotidiennement plus d'une tonne de nourriture par le biais d'une stratégie unique dans le monde animal : elles avalent une énorme quantité d'eau, qui va jusqu'à faire doubler leur volume, puis la recrachent en filtrant grâce à leurs fanons pour retenir les crustacés planctoniques et les petits poissons. Nicholas Pyenson, de l'Institut Smithsonian, et ses collègues ont découvert un organe sensoriel qui serait essentiel à cette stratégie.

Cet organe est situé à la jonction des deux mandibules de la mâchoire inférieure. Il contient notamment des papilles (de petites protubérances de la taille d'un doigt), qui boisonnent de vaisseaux sanguins et de terminaisons nerveuses encapsulées dans du tissu conjonctif. Une telle structure est caractéristique des mécanorécepteurs, des organes sensibles aux déformations mécaniques. Celles-ci pressent ou étirent les terminaisons nerveuses.



naison, qui déclenchent l'émission d'un signal nerveux.

Lorsque la baleine avale l'eau, sa poche buccale ne se gonfle pas passivement comme un parachute qui se déploie dans l'air, mais exerce une résistance – les muscles ventraux se contractent, ce qui assure une absorption plus progressive. Cette stratégie offre notamment l'avantage de freiner moins brutalement la baleine. Comme les deux mandibules

s'écartent et que les muscles ventraux les tirent, l'organe sensoriel se déforme. Il capte ainsi diverses informations, qui sont transmises au cerveau via des nerfs courant le long des mandibules. La baleine peut alors contracter de façon continue les muscles déformés par l'engouffrement actif, puis refermer la bouche pour que ses proies ne s'échappent.

→ G. J.

Nature, vol. 485, pp. 498-501, 2012

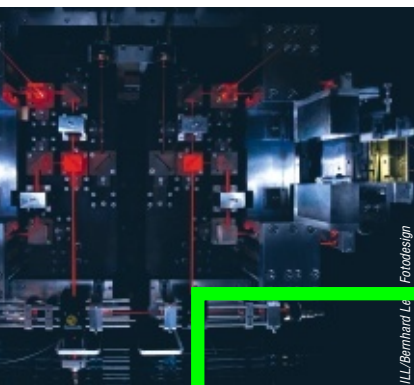
## Environnement

## VOIE LACTÉE: PASSÉ ACTIF

Le trou noir supermassif au centre de notre Galaxie est aujourd'hui très calme. Mais à partir des données du télescope gamma *Fermi*, Meng Su et Douglas Finkbeiner ont découvert des structures qui pourraient être les restes de deux jets de particules de hautes énergies. Partant du centre de la Voie lactée au-dessus et au-dessous du plan galactique, ils sont longs de 27 000 années lumière et auraient été produits à une époque où le trou noir était beaucoup plus actif.

## UN VIEUX CROCODILE GÉANT

Plus de huit mètres : ce serait la longueur d'un crocodile préhistorique, dont on a découvert le crâne et la mâchoire fossilisés dans le bassin du lac Turkana, au Kenya. C'est le plus grand crocodile connu. À partir de l'analyse des fossiles, des paléontologistes américains ont déduit la taille de l'animal et montré qu'il appartenait à une espèce inconnue. En comparaison, les plus grands crocodiles du Nil observés mesurent moins de 6,5 mètres.



La difficulté de la mesure de la réfraction des rayons gamma est due au très faible angle de déviation. Les scientifiques ont dû utiliser deux interféromètres de Michelson.

## Microbiologie

## Une vie aérobie au ralenti

Respirer de l'oxygène à 50 mètres de profondeur est une tâche ardue pour les organismes du sous-sol océanique : c'est ce que font des bactéries... depuis 86 millions d'années, selon Hans Røy, de l'Université d'Aarhus, au Danemark, et ses collègues.

On savait depuis plusieurs années que des communautés microbiennes vivent en profondeur dans les sédiments marins, mais les paramètres qui conditionnent leur développement et leur activité restaient à préciser. Les scientifiques se sont intéressés aux sédiments du gyre du Pacifique Nord, une région au large du Mexique où les courants marins forment un gigantesque tourbillon. Par rapport aux autres régions de l'océan, la production de phytoplancton y est la plus faible ; par conséquent, les sédiments sont très pauvres en carbone d'origine organique. On imaginait donc que cette zone était inhabitable pour les microbes.

En fait, les bactéries vivent dans les sédiments supérieurs, comme c'est le cas en général dans le sous-sol océanique sédimentaire. Or un tout autre scénario est apparu. Hans Røy et ses collègues ont prélevé des carottes sédimentaires jusqu'à 28 mètres de long dans neuf sites – trois dans le gyre et, pour comparaison, six le long de l'équateur – et analysé leur composition. Contrairement aux carottes prélevées le long de l'Équateur, celles du gyre contenaient des bactéries aérobies et de l'oxygène sur toute leur longueur.

© Shutterstock/Stephan Kerkhofs

Dans les sédiments du sous-sol océanique, des bactéries vivent à un rythme excessivement ralenti.

Par une modélisation, les scientifiques ont déterminé la vitesse de consommation d'oxygène d'une bactérie en fonction de sa profondeur. Au-delà de dix mètres, la consommation se stabilise. Elle est toutefois la même qu'avec l'énergie fournie, une bactérie ne peut se reproduire, en se divisant, qu'en plusieurs milliers d'années (contre quelques heures dans des conditions normales). Les sédiments situés à 28 mètres sous le fond marin – et donc l'écosystème qu'ils contiennent – sont vieux de 86 millions d'années. Ainsi, au fil du temps, les bactéries ont adapté leur métabolisme et leur consommation d'oxygène aux quantités de carbone organique disponibles.

→ Marie-Neige Cordonnier

H. Røy et al., *Science*, vol. 336, pp. 922-925, 2012

## Physique

## Vers l'optique en rayons gamma

Il est facile de manipuler la lumière visible avec des lentilles, des prismes et des miroirs. On pensait qu'il était impossible ou presque de dévier des rayons gamma, de fréquences bien plus élevées et de longueurs d'onde beaucoup plus courtes. Pourtant, Michael Jentschel, de l'Institut Laue-Langevin, à Grenoble, et ses collègues ont étudié la déviation des rayons gamma dans du silicium et ont montré qu'elle n'est pas négligeable.

La réfraction correspond à la déviation d'un rayon lumineux quand il passe d'un milieu à un autre, de l'air au verre par exemple. Chaque milieu est caractérisé par

un indice de réfraction défini comme le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à la vitesse de la lumière dans le milieu. Ainsi, quand un rayon passe d'un milieu à un autre, sa vitesse change et la lumière est déviée. En outre, l'indice de réfraction dépend de la fréquence de la lumière et semblait diminuer vers un aux fréquences élevées.

Pour le vérifier, les physiciens de Grenoble ont utilisé un faisceau parallèle de rayons gamma dont une partie traversait un prisme de silicium et l'autre une lame de verre. Les physiciens ont constaté que l'indice de réfraction est supérieur à un. Cette hausse

de l'indice de réfraction est due à la diffusion Delbrück : en présence d'un champ électrique des atomes du prisme, les photons gamma créent des paires électron-positron, qui s'annihilent en redonnant un photon. Cet effet ralentit la progression des photons dans le prisme et modifie l'indice de réfraction. Pour des noyaux plus lourds que le silicium, l'effet Delbrück devrait être plus intense et assez important pour envisager des dispositifs analogues à ceux de l'optique, mais destinés aux rayons gamma.

→ Sean Bailluy

D. Habs et al., *Physical Review Letters*, vol. 108, 2012

## Technologie

## Superdétecteur d'explosifs

Une équipe de chercheurs du CNRS, de l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis et de l'Université de Strasbourg, a conçu un détecteur capable de déceler des concentrations de TNT (trinitrotoluène, un explosif classique) de l'ordre de 800 molécules pour  $10^{15}$  molécules d'air. Cette sensibilité est un millier de fois supérieure à celle des détecteurs actuels et proche de celle de chiens entraînés. Le dispositif est formé d'un microlevier en silicium recouvert d'une couche d'épaisseur micrométrique de quelque 500 000 nanotubes de dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) alignés perpendiculairement à la surface. L'absorption de molécules de TNT par le dioxyde de titane, qui a une affinité élevée pour les composés à groupe nitro ( $-\text{NO}_2$ ), se traduit par une modification de la fréquence propre de vibration du microlevier. La méthode, inspirée par la structure des antennes de papillons, permet de détecter la présence d'autres explosifs, de drogues ou de polluants.

→ Maurice Mashaal

D. Spitzer et al., *Angewandte Chemie*, vol. 51 (22), pp. 5334-5338, 2012

ISL/MSSE - Fabien Schnell

## Archéologie

## Premiers paysans de Chypre

Environ 9500 ans avant notre ère, des chasseurs-cueilleurs du Levant s'essayaient aux premières cultures de plantes sauvages. Or Jean-Denis Vigne, du CNRS, et son équipe viennent de découvrir à Chypre un village d'agriculteurs datant de presque 9000 ans avant notre ère. C'est le plus ancien village de paysans de toutes les îles méditerranéennes. Le site, nommé Klimonas, comprenait divers bâtiments domestiques et une grande maison ronde semi-enterrée. À usage collectif, elle servait probablement à rassembler les récoltes. Mais des indices de sacrifices – flèches en silex, perles vertes enterrées – y ont aussi été mis au jour. Les archéologues ont découvert par ailleurs des restes de plantes locales et des graines carbonisées d'amidonier – un blé sauvage qui deviendra la première céréale domestiquée – ainsi que de nombreux restes d'outils lithiques et de parures en coquillage. Ces vestiges évoquent un mode de vie villageois typique de ce qui s'était développé au Levant quelques siècles seulement auparavant. Dès lors, se demande l'équipe, les tout premiers paysans levantins ont-ils fait la traversée vers Chypre ?

→ François Savatier

D. Vigne et al., *PNAS*, 7 mai 2012

## Physique

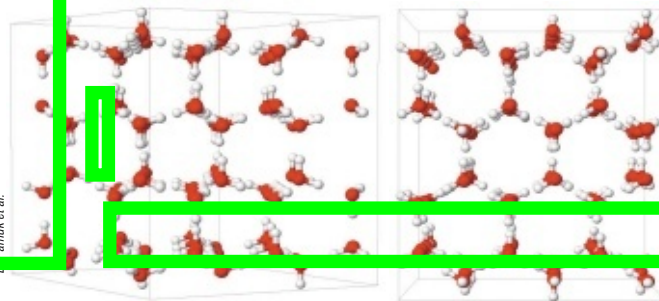
## Une anomalie quantique de l'eau expliquée

À très basse température, la glace d'eau a un comportement surprenant. Lorsque l'hydrogène de ses molécules est remplacé par du deutérium, un isotope plus lourd, le volume du cristal augmente, alors que les physiciens s'attendaient à une diminution. Une équipe dirigée par Maria Fernández-Serra, de l'Université Stony Brook aux États-Unis, a modélisé les phénomènes quantiques qui expliquent ce comportement de l'eau.

Le volume moyen occupé par une molécule s'obtient en divisant le volume du cristal par le nombre de molécules. Quand la température, donc l'agitation thermique, baissent, le volume diminue – mais jusqu'à une certaine limite, due au principe d'incertitude de Heisenberg. Selon ce dernier, il n'est pas possible d'attribuer à une particule une position et une vitesse parfaitement définies au même instant. Il en résulte une agitation d'origine quantique, présente même au zéro absolu, qui implique une limite inférieure au volume moyen occupé.

Le comportement quantique d'une particule étant d'autant plus marqué que sa masse est faible, l'agitation, donc le volume, correspondant à une molécule plus légère, devraient être plus importants. C'est ce que l'on constate pour le nombreux atomes et molécules – mais l'eau fait exception.

→ S.B.

B. Pamuk et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 108, 193003, 2012

Deux vues différentes de la structure d'un cristal de glace contenant 96 molécules (oxygène en rouge, hydrogène en blanc).

## Botanique

## Des formules pour les nervures des feuilles

Avec plusieurs collègues, Lauren Sack, de l'Université de Californie à Los Angeles, a déterminé que la nervation des feuilles des dicotylédones obéit à des lois de puissance.

L'examen de la nervation de feuilles de 185 espèces de plantes dicotylédones a établi que des traits tels que la densité de nervures (longueur totale des nervures par unité de surface), leur diamètre ou leur volume s'expriment sous la forme  $a/b$ ,  $S$  étant la superficie de la feuille et  $a$  et  $b$  des constantes indépendantes de l'espèce, pour un ordre de nervures donné (la nervure centrale est dite du premier ordre, celle se ramifiant à partir d'elle sont du 2<sup>e</sup> ordre, etc.).

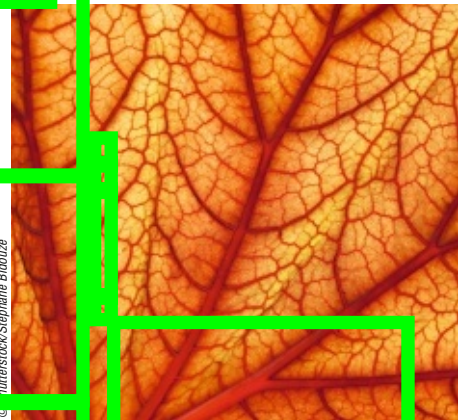
Par exemple, pour la densité des nervures du 2<sup>e</sup> ordre, les chercheurs trouvent que l'exposant  $b$  est égal à environ  $-0,4$ . En fait, seules les nervures majeures (jusqu'au 3<sup>e</sup> ordre) obéissent à ces lois; les traits relatifs aux nervures mineures se révèlent indépendants de la taille de la feuille.

Ces observations ouvrent diverses perspectives. Par exemple, elles permettent de comprendre pourquoi, dans les milieux secs ou fortement exposés, les feuilles de petite taille dominent. L'évaporation d'eau au niveau des feuilles entraîne, pour compenser, un pompage d'eau dans le sol par la plante; mais si le sol est trop sec, de l'eau peut être aspiré, parvenir à la feuille et

provoquer une embolie (un blocage de la circulation de la sève). Or, comme l'a montré l'équipe de L. Sack, les petites feuilles ont un réseau plus dense de nervures majeures, qui offre à la sève davantage de voies pour contourner un éventuel bouchon – d'où une meilleure adaptation à des conditions de sécheresse.

Grâce aux lois trouvées, la taille des feuilles peut être estimée à partir de petits fragments. Cela devrait intéresser les paléontologues: les fossiles de feuilles pourraient ainsi indiquer, *via* la taille des feuilles, si les plantes en question poussaient sous un climat sec.

Nature Communications, en ligne le 15 mai 2012



Les feuilles des dicotylédones (ici une jeune de *geranium rouge*) ont une nervation complexe, en partie décrite par des lois de nature mathématique.

**3,2 POUR CENT**: c'est l'augmentation des émissions mondiales de dioxyde de carbone entre 2010 et 2011. Elles ont atteint 31,6 gigatonnes, un record absolu.

## Archéologie

## La plus ancienne table astronomique maya

Les prêtres mayas avaient de bonnes connaissances astronomiques. Lors de leur conquête du Mexique, les Espagnols ont retrouvé leurs observations et leurs prédictions consignées

dans des livres en papier d'écorce, les *codex*. Ceux qui restent aujourd'hui sont tous postérieurs au XI<sup>e</sup> siècle. Or William Saturno, de l'Université de Boston, et ses collègues ont découvert ce qui serait

une table astronomique, peinte et gravée sur les murs d'une résidence de la cité maya de Nakum, au Guatemala, qui est datée du début du IX<sup>e</sup> siècle de notre ère. Ce serait la plus ancienne connue.

Les inscriptions comprennent des nombres et des symboles figurant des « mois » et des jours des deux calendriers utilisés par les Mayas: le *tzolk'in*, un calendrier religieux de 260 jours, et le *Haab*, un calendrier solaire de 365 jours. Les nombres évoquent des dates, correspondant au nombre de jours qui les séparent soit de la création mythique du monde (en l'an 3114 avant notre ère pour certains spécialistes, mais cette date varie selon les cités mayas), soit de jours particuliers du *tzolk'in*.

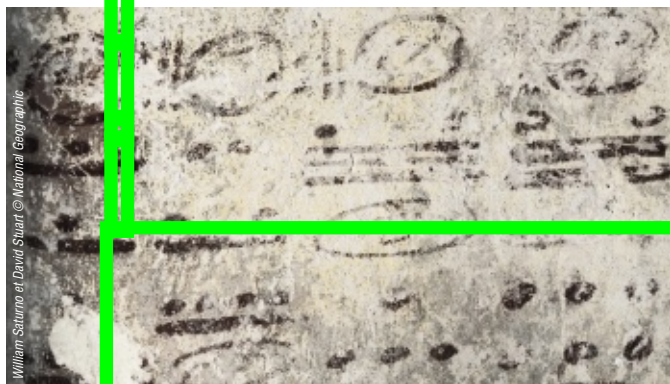
Bien que la signification précise de ces indications calendaires reste à déterminer, plusieurs

indices font penser à une table astronomique. On trouve par exemple une série de dates surmontées par des symboles représentant la Lune et séparées par un intervalle de 178 jours, qui correspondent à six lunaisons (la durée qui sépare deux nouvelles lunes); de tels « semestres lunaires » étaient utilisés dans les codex pour prévoir les éclipses de Soleil.

D'autres nombres semblent liés à Vénus et à Mars, tels des multiples communs de 584 et 780 (Vénus et Mars retrouvent les mêmes positions dans le ciel terrestre respectivement tous les 584 et 780 jours). Les inscriptions concerneraient donc les cycles des planètes, auxquels la vie religieuse maya était intimement liée.

→ G. J.

W. Saturno et al., *Science*, vol. 336, 111-113, 2012



Les inscriptions calendaires découvertes comportent des jours et des « mois » mayas (en haut de chaque colonne), ainsi que des nombres figurant le temps écoulé. Une barre vaut 5, un point 1 et le signe aux trois « cercles » (au milieu) représente zéro.

## Biologie végétale

## L'horloge dérégulée de l'orge

La floraison est une étape cruciale dans le cycle de croissance d'une plante, car elle conditionne ses chances de reproduction. Si elle est trop tardive, la pollinisation, le développement du grain ainsi que sa dissémination peuvent être remis en cause. Chez la plupart des espèces, le déclenchement de la floraison est assuré par l'horloge biologique et l'allongement des jours. Sébastien Faure, du Centre John Innes à Norwich au Royaume-Uni, et ses collègues ont identifié la mutation génétique *eam8* qui, en perturbant l'horloge biologique de l'orge, conduit à une floraison précoce, adaptée à la courte saison estivale en Scandinavie. Ce dérèglement de l'horloge biologique a un deuxième avantage : l'horloge ne régule plus la production d'une protéine importante dans la photosynthèse, celle de cette protéine par l'orge est alors uniquement contrôlée par la présence de lumière, ce qui permet d'exploiter les longues journées d'été pour produire de la biomasse.

→ S. B.

S. Faure et al., PNAS, en ligne le 7 mai 2012

## Préhistoire

## 37 000 ans d'art mural...

L'Abri Castanet, dans le Tarn-et-Garonne, présenterait les plus anciennes traces d'art mural connues. Dans cet abri-sous-roche, Raphaëlle Bouillon, du Laboratoire travaux et recherches archéologiques sur les cultures, les espaces et les sociétés à Toulouse, et ses collègues ont découvert des œuvres créées par des Aurignaciens, les premiers hommes modernes qui auraient peuplé l'Europe il y a entre 40 000 et 25 000 ans. Sur la face inférieure d'un rocher faisant partie du plafond effondré de l'abri, les archéologues ont ainsi mis au jour des gravures et des peintures représentant notamment un sexe féminin et un animal. D'après la datation au carbone 14 de différents fragments d'os prélevés sous le bloc de pierre, ces œuvres ont environ 37 000 ans. Elles ont été réalisées par les habitants du quotidien des habitants de l'Abri Castanet : elles ont été exécutées là où vivaient les hommes, comme en témoignent les traces de feu, les nombreux outils et ornements découverts sur place.

→ S. B.

14 mai 2012

## DERNIÈRE minute ...

## DES RATS PARAPLÉGIQUES GUÉRIS

À l'École polytechnique fédérale de Lausanne, l'équipe de Grégoire Courtine a lésé la moelle épinière de rats, qui ne pouvaient donc plus marcher. Elle a ensuite placé les rats dans un système robotique qui les maintenait sur leurs pattes arrière et a stimulé électriquement et avec des neurotransmetteurs les neurones dormants de leur moelle épinière. Après neuf semaines, les

rats marchent de nouveau pour atteindre une récompense : leurs neurones ont créé de nouvelles projections qui contournent la lésion.

## DES EFFLORESCENCES SOUS LA BANQUISE

Kevin Arrigo et ses collègues, de l'université Stanford, ont découvert lors d'une expédition en Arctique une efflorescence massive de plancton se développant sous la banquise. Une telle

## Géosciences

## Cristaux et pics volcaniques

Comment savoir si un volcan en début d'activité va se calmer ou, au contraire, être le siège d'une éruption ? L'étude systématique des cristaux charriés par le magma jusqu'en surface pourrait apporter des éléments de réponse. En analysant la composition chimique des cristaux présents dans les laves émises par le mont Saint Helens, aux États-Unis, en 1980 et 1986, Kate Saunders, de l'université de Bristol, en Angleterre, et ses collègues ont établi que leur vitesse de croissance est corrélée à l'activité volcanique, au volcan, et à ses émissions de gaz – deux autres indices utilisés pour suivre l'activité volcanique.

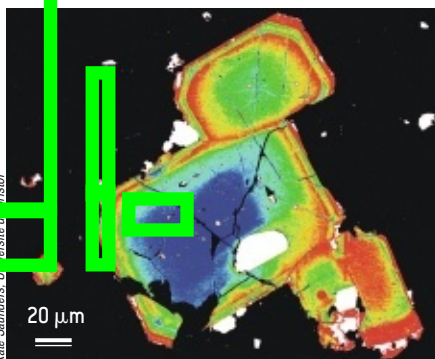
Un magma est un mélange de roche en fusion, de bulles de gaz et de cristaux en suspension. Dans la chambre magmatique et le conduit du volcan, la croissance des cristaux varie en fonction de paramètres qui déterminent l'activité du volcan : composition, contenu gazeux, température, pres-

sion, oxygénation, etc. Ces variations se traduisent par des zones concentriques de compositions chimiques légèrement différentes qui, tels les cernes des arbres, reflètent la croissance des cristaux au fil du temps. Par microscopie électronique et microanalyse chimique, les géochimistes ont déterminé le profil de ces zones sur 300 cristaux d'orthopyroxène ou  $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$  provenant de neuf laves différentes.

Ils ont constaté que les pics de croissance des cristaux coïncident avec les pics d'activité sismique et d'émission de dioxyde de soufre ayant été enregistrés dans les mois précédant les éruptions. Cette étude suggère un nouveau moyen de lier les signes observés en surface aux phénomènes se produisant en profondeur du magma. L'analyse des laves en surface permettra-t-elle de mieux prévoir les éruptions ?

→ M.-N. C.

K. Saunders et al., Science, vol. 336, pp. 1023-1027, 2012



Les zones concentriques de cristaux d'orthopyroxène issus de l'éruption de 1980 du mont Saint Helens. Les (fausses) couleurs distinguent les zones de compositions chimiques différentes. Le jaune, par exemple, indique ici une zone riche en fer.



Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

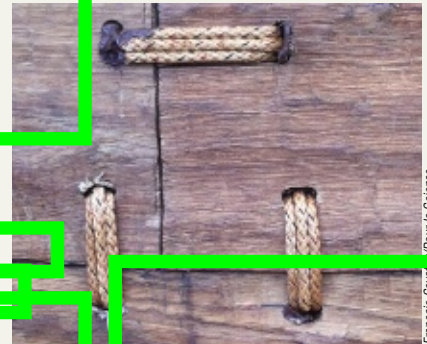
## Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

## → UNE SOURCE GAMMA COMPACTE

En 2006, Chandrasekhar Joshi nous présentait les accélérateurs à plasma et leurs applications potentielles (voir « Surfer sur des ondes de plasma », *Pour la Science*, mars 2006, [http://bit.ly/PLS341\\_Joshi](http://bit.ly/PLS341_Joshi)). Des physiciens du Laboratoire d'optique appliquée (ENSTA-ParisTech, École polytechnique), à Palaiseau, viennent de montrer comment les utiliser pour obtenir des rayons X et gamma (*Nature Photonics*, mai 2012). Le rayonnement gamma, très utile dans les recherches actuelles, devait jusqu'ici être produit par de très encombrants accélérateurs classiques.

Les chercheurs exploitent l'effet Compton inverse, dans lequel des photons reçoivent de l'énergie d'électrons : lors d'une collision frontale avec un électron relativiste, le photon du laser rebondit et gagne une énergie considérable, qui le fait passer de l'infrarouge au domaine X ou gamma. Cette méthode est déjà utilisée pour produire des rayons gamma avec des accélérateurs classiques, mais les chercheurs du LOA ont réussi à la mettre en œuvre à l'échelle d'une table. Pour cela, ils font interagir une impulsion laser ultrabrève et intense avec un jet d'hélium. En se propageant dans le gaz, l'impulsion crée dans son sillage une structure ionisée dont l'effet est de piéger, puis d'accélérer un paquet d'électrons jusqu'à environ 100 mégaelectronvolts en quelques

millimètres. L'impulsion laser, qui précède le paquet d'électrons, est réfléchi par une lame mince placée à l'arrière du jet et entre en collision avec les électrons. Les flans de rayonnement gamma alors produits dans la direction de propagation du laser sont 10 000 fois plus intenses que ceux produits par les sources existantes.



François Suard / Pour la Science

→ UN BATEAU À BORDS COUSUS  
PREND L'EAU À DOUVRES

Le calfatage d'un bateau n'est pas un détail. En 2002, Jacques Connan nous en démontrait l'importance en révélant que cette technique n'a guère varié depuis 2 000 ans (voir « Le calfatage des bateaux », *Pour la Science*, juin 2002, [http://bit.ly/PLS298\\_Connan](http://bit.ly/PLS298_Connan)). Pourquoi alors les charpentiers de marine, qui, depuis plusieurs mois, s'évertuent à répliquer un bateau de l'âge du bronze trouvé en Angleterre dans les années 1990, ne se sont-ils pas donnés le temps de franchir cette étape par des essais méticuleux ? S'ils l'avaient fait, leur néo navire n'aurait pas immédiatement pris l'eau au cours de sa mise à l'eau officielle le 12 mai 2012, dans le port de Douvres...

Construit vers 1550 avant notre ère, le bateau de Douvres est sans doute le plus ancien navire d'Europe apte à la navigation en mer. Sa découverte est d'une grande importance scientifique : elle nous ren-

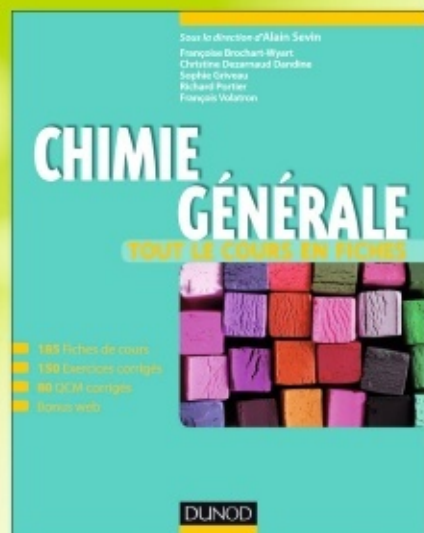
seigne avec un grand luxe de détails sur la charpente de marine de l'âge du bronze. C'est pourquoi un pan du projet européen BOAT 1500 BC, porté par l'Université Lille 3 associée à six autres partenaires, dont l'INRAH et le *Canterbury Archaeological Trust*, consiste à refaire les gestes des constructeurs de bateau de l'âge du bronze. Pour l'heure, deux charpentiers ont appris à sculpter à l'herminette de bronze de lourds éléments en chêne, puis à les fixer l'un à l'autre à l'aide de coins et de liens (voir la *photographie ci-dessus*). Les éléments qu'ils ont assemblés ont dû être taillés dans un énorme chêne long de dix mètres et dépouillé de nœuds. L'arbre correspondant a dû pousser 300 ans durant dans une forêt assez touffue pour empêcher les départs de branches latérales... L'un des enseignements de l'expérience de Douvres est donc que de tels arbres, aujourd'hui rarissimes voire introuvables, ne l'étaient pas à l'âge du bronze.

Réaliser une réplique à l'échelle 1/2 est la première étape du pan d'archéologie expérimentale du projet BOAT. L'objectif ultime est de reproduire le bateau de Douvres, puis de franchir les 35 kilomètres du détroit à la pagaie. Si la découpe est aujourd'hui maîtrisée, il reste le calfatage. Pour l'heure, la réplique est cousue de cordes contemporaines et jointoyée à la silicone, alors que son modèle l'était de cordes en fibres d'aulier d'if et calfaté à l'aide de cire d'abeille et des mêmes fibres. Le pan d'archéologie expérimentale du projet BOAT est en *working progress*, comme on dit en anglais. Son prochain objectif logique est de reproduire le calfatage des bateaux qui naviguaient sur la Manche à l'âge du bronze.

## → STRESS ET VIOLENCE

Le stress dû à la pauvreté affecte la santé de multiples façons, qu'a détaillé Robert Sapolsky (voir « Le stress de la pauvreté », *Pour la Science*, janvier 2006, [http://bit.ly/PLS399\\_Sapolsky](http://bit.ly/PLS399_Sapolsky)). L'un des autres effets du stress serait d'accroître la violence masculine, dit le préjugé. Or Markus Heinrichs et Bernadette van Dawans, de l'Université de Fribourg, viennent de montrer que ce n'est pas toujours le cas (*Psychological Science*, 2012). Après avoir utilisé un protocole pour stresser des hommes en leur demandant de prendre la parole en public, ils ont étudié leur comportement alors qu'ils participaient ensuite à des jeux de société. Ils ont découvert que, loin de multiplier les comportements socialement négatifs tels que la punition ou l'altération, ces hommes stressés ont davantage partagé et coopéré. En d'autres termes, ils ont augmenté les comportements favorisant les contacts sociaux. Pourquoi ? « Parce que cela déstresse », interprète M. Heinrichs. On le savait déjà : les situations difficiles font du bien, mais maintenant, la science le dit aussi !

# LA RENTRÉE DES SCIENCES CHEZ DUNOD



Sous la dir. d'Alain SEVIN et al.

Juin 2012 ■ 9782100570201 ■ 35 €

Prix de lancement 29 €

jusqu'au 31 octobre 2012

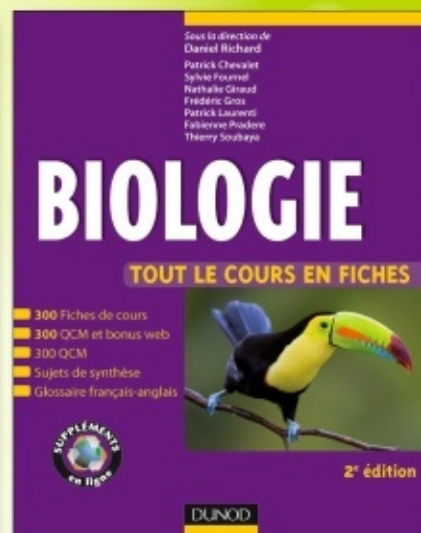


Sous la dir. de Daniel BOUJARD et al.

Juillet 2012 ■ 9782100564255 ■ 35 €

Prix de lancement 29 €

jusqu'au 31 octobre 2012



Sous la dir. de Daniel RICHARD et al.

Octobre 2012 ■ 9782100582235 ■ 45 €

Prix de lancement 39 €

jusqu'au 31 décembre 2012

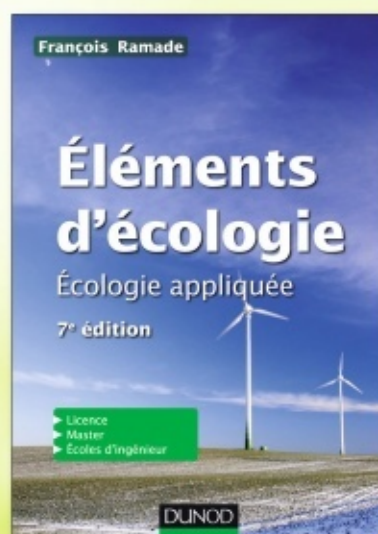
**Collection**  
**« TOUT LE COURS EN FICHES »**

- ◆ Des fiches de cours synthétiques et illustrées
- ◆ Des QCM pour s'évaluer
- ◆ Des exercices corrigés pour s'entraîner
- ◆ Des bonus web pour l'enseignant et pour l'étudiant



Richard B. PRIMACK, Jane LECOMTE,  
François SARRAZIN

Août 2012 ■ 9782100567089 ■ 39 €



François RAMADE

Septembre 2012 ■ 9782100579815 ■ 69 €

Prix de lancement 59 €

jusqu'au 31 décembre 2012

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

**DUNOD**  
ÉDITEUR DE SAVOIRS

## POINT DE VUE

### Une agence de la recherche à transformer

*Depuis 2006, une grande part des crédits consacrés à la recherche scientifique française va aux projets sélectionnés par une agence nationale, l'ANR. Un rapide bilan montre que le rôle et le fonctionnement de cette institution sont à revoir.*

Michèle LEDUC et Elisabeth GIACOBINO

Dans une nouvelle publiée en 1961 et intitulée *La fondation Mark Gable*, Leo Szilard, proche collaborateur d'Albert Einstein, inventait un dialogue amusant, où un interlocuteur proposait : « Le progrès scientifique est déjà bien assez rapide, pourquoi ne pas faire quelque chose pour le retarder ? Vous pourriez créer une fondation dotée de 30 millions de dollars par an. Les chercheurs impécunieux pourraient demander une subvention. Organisez 10 comités composés chacun de 12 savants. Les meilleurs savants seraient enlevés à leurs laboratoires. Les travailleurs scientifiques impécunieux s'appliqueraient à résoudre les problèmes fructueux qui leur permettraient presque certainement d'arriver à des résultats publiables. En ne cherchant que l'évident, la science deviendrait quelque chose comme un jeu de société. Il y aurait des modes... »

De façon prémonitrice, Szilard faisait le procès de la recherche scientifique fondée sur des projets financés par des agences spécialisées – un système aujourd'hui généralisé sous différentes formes selon les pays. Or la répartition des crédits est un enjeu considérable pour le progrès scientifique, qui lui-même est le levier de cette innovation que tous les gouvernements appellent de leurs vœux.

En France, le contexte a récemment beaucoup changé. Il y a seulement dix ans, le financement des laboratoires de qualité, le développement de nouvelles, le soutien aux jeunes équipes étaient pour

l'essentiel assurés par le ministère en charge de la recherche, par le CNRS et les autres organismes publics, complétés par des contrats de la Commission européenne.

Aujourd'hui, les universités sont devenues autonomes et une puissante Agence nationale de la recherche, l'ANR, a été créée en 2006 pour financer des projets de recherche généralement dans le cadre de programmes thématiques que l'ANR a elle-même définis. Simultanément, les moyens des grands organismes de recherche se sont réduits et leur influence a diminué.

De ce fait, les chercheurs se voient offrir de recevoir des contrats de l'ANR ; ce ne sont d'ailleurs pas les chercheurs impécunieux

### L'ANR DEVANT AGIR EN PLEINE CONCENTRATION AVEC LES AUTRES OPERATEURS DE RECHERCHE.

Il est anormal qu'elle fonctionne en circuit fermé.

évoqués par Szilard, mais plutôt, en général, des groupes de bon niveau. En revanche, les crédits récurrents des laboratoires, quelle que soit leur qualité, sont devenus très faibles. Les moyens des organismes de recherche se sont concentrés sur l'attribution des postes de chercheurs et les grands équipements. Or sans crédits de fonctionnement, il devient impossible aux laboratoires de maintenir leur vie collective.

Les modestes prélèvements sur les contrats obtenus par leurs équipes permettent à peine de faire fonctionner les services géné-

raux. Il est donc urgent que les organismes de recherche aient à nouveau un socle suffisant de moyens récurrents à allouer à leurs laboratoires.

Peut-on pour autant se passer d'une agence nationale de la recherche ? Faut-il, à l'inverse du courant récent, reconcentrer les moyens sur les grands organismes ? Dans le contexte actuel où les opérateurs de la recherche sont multiples, il est nécessaire qu'une grande partie des crédits de recherche soit distribuée en fonction d'une évaluation nationale et interdisciplinaire, en privilégiant la qualité et en évitant les conflits d'intérêt.

Comme dans les autres grands pays, il importe donc de maintenir en France une agence nationale de la recherche. Toutefois, le fonctionnement de l'ANR ainsi que son positionnement sont à repenser.

En 2011, l'ANR a attribué un budget total de 772 millions d'euros aux projets de recherche qu'elle a sélectionnés. Cela peut paraître considérable ; en réalité, il faut comprendre que l'ANR a de nombreuses missions, qu'elle finance des programmes variés, incluant des coopérations internationales et des recherches en partenariat avec l'industrie. Et les projets de recherche « blancs », ceux qui n'entrent pas dans les programmes prédéfinis par l'Agence (où l'on retrouve les « modes » de Szilard...), n'ont qu'une part limitée. Qui plus est, le taux de sélection des projets, avec au mieux 20 pour cent de réussite pour les équipes candidates, est devenu décourageant : le processus élimine ainsi de façon arbitraire de très bonnes propositions.

Ce fait le taux de sélection est-il lié à l'augmentation du nombre des dossiers déposés ? Pour compenser les aléas, les équipes sont en effet poussées à multiplier les demandes et à solliciter des financements de plus en plus élevés, que l'ANR se refuse d'ailleurs à plafonner. Le temps passé par les scientifiques à rédiger des projets d'une part, à évaluer ceux des collègues d'autre part, augmente lui aussi.

En outre, les règles du jeu des appels à projet ne sont pas toujours bien adaptées aux besoins. Les chercheurs doivent sans cesse échafauder des projets nouveaux sans avoir les moyens de poursuivre ceux en cours, contrairement à ce qui se pratique dans les autres pays. L'horizon des travaux financés par l'ANR est de trois ans, une durée très insuffisante pour les programmes ambitieux. De plus, l'agence impose de s'associer à des par-

tenaires, ce qui donne souvent lieu à des montages artificiels.

Enfin, le fonctionnement des comités d'évaluation fait l'objet de critiques : manque de transparence, biais dus à des effets de mode (Juziord avait vu juste...), cas de fuites d'idées et de conflits d'intérêt non déclarés...

Sur un plan plus général, l'ANR devrait agir en pleine concertation avec les autres opérateurs de la recherche. Il est anormal qu'elle fonctionne en circuit fermé, avec ses propres conseils, ses cercles de réflexion stratégiques autonomes et ses règles administratives toujours plus complexes. L'évaluation doit s'appuyer sur une connaissance profonde des laboratoires sur l'ensemble du territoire.

On peut se demander comment la future agence pourra améliorer son fonctionnement, sachant que le paysage budgétaire sera très contraint, avec des moyens redis-

tribués. Une bonne solution serait de limiter le champ d'action de l'agence au soutien de la recherche publique, comme le fait l'agence de recherche allemande, la DFG, et d'acquiescer une fraction importante du budget aux programmes blancs les plus créatifs. Ce qui n'empêche pas de réfléchir par ailleurs à la meilleure façon d'encourager la recherche partenariale et celle menée dans les entreprises.

*Michèle ELJC dirige l'Institut francilien des atomes froids (IFRAF), à Paris.*

*Élisabeth GIACOBINO est présidente du conseil d'administration de l'Institut d'optique.*

*M. Leduc et É. Giacobino, Pour une réforme en profondeur de l'Agence nationale de la Recherche, Revue de la physique n° 29, p. 32-33, mai 2012 (en accès libre sur [www.refletsdelaphysique.fr](http://www.refletsdelaphysique.fr)).*



Réagissez en direct à cet article sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

## DÉVELOPPEMENT DURABLE

# Pêcher varié pour pêcher durable

*Des simulations récentes suggèrent que la pêche nuirait moins aux écosystèmes si elle ciblait des gammes plus larges d'espèces et de tailles de poissons.*

**Marie-Joëlle ROCHET**

Quand des poissons abîmés, trop petits ou appartenant à une espèce sans valeur commerciale sont capturés, ils sont généralement rejetés à la mer, morts ou « fatigués ». De tels rejets gaspillent les ressources et causent une mortalité inutile chez les poissons. Aussi la Commission européenne souhaite-t-elle abolir cette pratique. Pour ce faire, elle préconise de rendre la pêche plus sélective, afin de ne capturer que les poissons assez gros et appartenant à des espèces commerciales. En

ajoutant à la taille des mailles, les matériaux et les comportements différents des espèces, on réalise des progrès constants dans la sélectivité des engins de pêche (casiers, lignes, filets...) : par exemple, si l'on veut laisser échapper des poissons qui nagent vers le haut (à l'inverse d'autres qui se laissent porter par le courant), on ménage des ouvertures dans le haut du filet. Le choix des lieux et des saisons de pêche permet aussi de mieux cibler les captures.

Toutefois, ces progrès pourraient entrer en conflit avec une autre contrainte, de plus

en plus mise en avant : le bon fonctionnement de l'écosystème. La pêche n'affecte pas que les espèces capturées, elle peut aussi modifier leur habitat et se répercuter sur les chaînes alimentaires. Gérer les stocks ne suffit pas, il faut aussi protéger la biodiversité marine : la France, l'Union européenne et de nombreux autres pays s'y sont engagés dans diverses conventions internationales. Cette perspective écosystémique pourrait remettre en cause notre conception de la sélectivité. Non seulement dans le milieu marin que les composantes



→ [pouirlascience.naturejobs.com](http://pouirlascience.naturejobs.com)

**Nouveau service d'offres d'emplois scientifiques sur**

**POUR LA SCIENCE**

en partenariat avec **naturejobs**



- Chaque semaine, plus de **8000 offres d'emploi** dans le secteur des sciences.
- En un clic la **sélection des postes à pourvoir** en France et dans les pays francophones ou voisins.
- Une équipe Naturejobs spécialisée, **au service des recruteurs francophones**.  
Contact : Muriel Lestringuez  
E-mail : [m.lestringuez@nature.com](mailto:m.lestringuez@nature.com)  
Tél. : +44 20 7843 4994

**POUR LA SCIENCE.fr**

Le site de référence de l'actualité scientifique

valorisées sur le marché ne risque-t-il pas de créer des déséquilibres ?

La « sélection artificielle » résultant de la pêche des plus grands poissons d'une espèce a plusieurs conséquences : elle entraîne une diminution de la taille des poissons quelle soit leur âge et une baisse de l'âge moyen des individus reproducteurs, qui engendrent moins de descendants (chez les poissons, la fécondité et la viabilité des œufs ponus augmentent de façon exponentielle avec l'âge et la taille de la mère). On ignore si ces changements sont réversibles, mais il est établi que plus la pêche est sélective ou intensive, plus ils sont importants. Des décennies de pêche ont remodelé la communauté des poissons de la mer du Nord, où dominent aujourd'hui les jeunes individus et des espèces qui, même à l'âge adulte, n'atteignent jamais une grande taille. De même, sur le plateau écossais (au large de la Nouvelle-Écosse, au Canada), les proportions relatives des différents niveaux trophiques (proies, prédateurs, superprédateurs) ont été bouleversées.

Plusieurs modélisations récentes suggèrent que des prélèvements plus équilibrés, reflétant les proportions naturellement présentes dans l'écosystème, auraient moins d'effets, à quantités égales de poissons capturés. L'un des modèles néglige les espèces, mais décrit les relations de prédation, en spécifiant que les gros poissons mangent les petits. Il montre que la pêche, quand elle est très sélective, déstabilise l'écosystème : la déplétion causée par l'exploitation se propage par le jeu des relations prédateur-proie (lorsqu'on pêche trop la proie, le prédateur manque de ressources et se raréfie aussi), et la biomasse totale oscille avec le temps. Au cours des oscillations, les quantités de poissons passent par des minima, où l'écosystème est vulnérable face aux aléas environnementaux ; le risque d'extinctions est alors élevé. Plus la pêche est sélective, plus l'amplitude des oscillations est importante, surtout si les grands poissons sont ciblés.

D'autres modèles plus complexes, prenant en compte des espèces et des écosystèmes variés, montrent que l'exploitation sélec-

tive est toujours la plus nuisible pour la biodiversité. Elle ne préserve cette dernière que pour les quantités de poissons capturés économiquement non rentables. En revanche, si la pêche vise des groupes moins sensibles d'espèces ou de tailles, elle peut être plus intensive – tout en restant modérée – sans provoquer d'extinctions ou de réduction de la biomasse.

Ces modèles devront être précisés et les incertitudes de la pêche sélective confirmées de façon empirique (les cas de la mer

**DES DÉCENNIES DE PÊCHE**  
ont remodelé la communauté  
des poissons de la mer du Nord,  
où dominent les jeunes  
individus et les petites espèces.

du Nord et du plateau écossais ne suffisent pas, car l'intensité de la pêche y a été si forte qu'elle masque le rôle de la sélectivité). Cependant, les indices sont déjà assez nombreux pour qu'un nouveau modèle commence à s'imposer : celui de la pêche équilibrée, qui consiste à exploiter la gamme la plus large possible d'espèces et de tailles, d'une façon modérée et représentative de leur distribution naturelle. Les moyens de mettre ce concept en pratique restent à préciser ; l'un des idées consiste à utiliser une grande diversité d'engins de pêche, ciblant différentes composantes de l'écosystème.

La pêche équilibrée nécessitera de valoriser les espèces de petite taille, mal connues ou peu appréciées. Les nouvelles utilisations qui se développent – surimi, farines et huiles pour nourrir les poissons d'élevage, carburant pour les moteurs des navires... – le permettent sans doute. Des politiques d'incitation pourraient y aider. Au lieu d'exploiter les poissons à leur rendement maximal, calculé indépendamment pour chaque espèce, nous devons repenser notre utilisation des ressources halieutiques dans leur ensemble.

*Marie-Joëlle ROCHET est chercheur dans l'Unité Écologie et modèles pour l'halieutique à l'Ifremer, à Nantes.*

# DES GIGA OCTETS DE CULTURE SCIENTIFIQUE À VOTRE DISPOSITION !



## ABONNEZ-VOUS

### 12 n°s • 56 €

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

soit 25 % de réduction !



## BULLETIN D'ABONNEMENT

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

POUR LA  
**SCIENCE**

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

☐ 1 an • 12 numéros • 56 €

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

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

Tarif valable

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

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

☐ 1 an • 16 numéros • 76 €

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-Mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16 € – autres pays 25 €.

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

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

J'indique mes coordonnées :

Nom : \_\_\_\_\_

Prénom : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

CP : \_\_\_\_\_ ville : \_\_\_\_\_

Pays : \_\_\_\_\_

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

\_\_\_\_\_@\_\_\_\_\_

Je choisis mon mode de règlement :

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

☐ Par carte bancaire

Numéro de carte \_\_\_\_\_

Date d'expiration \_\_\_\_\_

Signature obligatoire

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

## VRAI OU FAUX

## Y a-t-il des « peaux à moustiques » ?

*Oui. Les moustiques détectent leurs victimes grâce à leur odeur, et chaque individu dégage un cocktail olfactif particulier, plus ou moins attractif pour les insectes.*

Guillaume JACQUEMONT

**L**e paludisme, une maladie provoquée par les moustiques, est un bon indicateur des cibles de ces derniers. Selon une étude réalisée sur des enfants africains et menée par David Smith, de l'Institut américain de la santé, quelque 20 pour cent des individus concentrent 80 pour cent des contaminations. Un même enfant subit ainsi plusieurs contaminations successives (l'étude concernait une forme de paludisme dont on peut guérir en quelques mois). Pourquoi certains individus sont-ils plus piqués que d'autres ?

Selon Vincent Corbel, chargé de recherche à l'Institut de recherche pour le développement (IRD), le moustique localise ses victimes grâce à plusieurs systèmes de détection. Quand il est à proximité, il repère les surfaces de peau libre grâce à la température corporelle. Jusqu'à dix mètres, il détecte ses victimes visuellement. Jusqu'à 100 mètres, il se fonde également sur les odeurs et se dirige en suivant le gradient de concentration des molécules olfactives.

Il s'agit par exemple du dioxyde de carbone dégagé par la respiration, de l'octenol et de l'acide lactique issus de la transpiration, de phéromones, de molécules émises par la flore bactérienne qui vit sur la peau... Leurs effets se combinent, renforçant le pouvoir attractif.

Ainsi, chacun de nous dégage un cocktail olfactif particulier, plus ou moins attirant pour le moustique. De nombreux paramètres influent sur ce mélange, tels l'âge et l'état physiologique. Notons que les femmes enceintes et les buveurs d'alcool attirent plus les moustiques. L'augmentation de la respiration et de la transpiration associée à ces deux états

serait en cause, car elle entraîne une libération accrue de composés olfactifs. Les modifications hormonales, pour les femmes enceintes et les composés issus de la dégradation métabolique de l'alcool, pour les buveurs, seraient aussi impliqués. Les préférences des moustiques se manifestent même pour les espèces ciblées : certains ne piquent que le bétail, d'autres uniquement les hommes, d'autres encore les deux...

Les moustiques choisissent non seulement leurs victimes, mais aussi les zones qu'ils attaquent : les chevilles, les genoux et le cou concentrent 80 pour cent des



**LES MOUSTIQUES** détectent leurs victimes de loin, grâce à leurs antennes tapissées de récepteurs olfactifs.

piqûres. Ces zones sont dégagées et moins exposées à un mouvement défensif de l'homme. Les pieds sont aussi visés, notamment parce qu'ils dégagent de multiples odeurs, comme l'ont montré des études sur des chaussettes sales !

Pourquoi les moustiques sont-ils sensibles à certaines odeurs ? Selon V. Corbel, cela est dû aux récepteurs qui tapissent les

neurones de leurs antennes, sur lesquels se fixent certaines molécules olfactives. Il existe plusieurs centaines de ces récepteurs, codés par des gènes différents. Les moustiques portent des combinaisons particulières de récepteurs, ce qui les rend sensibles à des odeurs spécifiques. Ces dernières peuvent être attractives ou répulsives pour l'insecte.

L'identification des récepteurs et des molécules qui s'y fixent fait l'objet de nombreuses recherches. John Carlson et Alison Carey, de l'Université Yale, aux États-Unis, ont travaillé sur la drosophile, plus simple et plus facile à manipuler génétiquement que le moustique : en faisant en sorte que les drosophiles expriment, un par un, les gènes de récepteurs de moustique, ils ont déterminé à quelle molécule olfactive chacun était associé.

Ces travaux nous aideront-ils à mieux nous protéger des moustiques ? Aujourd'hui, on s'enduit de répulsif ou on se réfugie sous une moustiquaire. Celle-ci, si elle est imprégnée de substances qui repoussent et tuent les moustiques, est le système le plus efficace, mais elle ne protège pas contre les piqûres à l'extérieur.

Une meilleure connaissance des molécules et des mécanismes en jeu dans l'olfaction ouvrirait plusieurs pistes pour améliorer nos défenses : inhibition des récepteurs par des molécules qui s'y fixeraient sans déclencher de signal attractif, dissémination de moustiques dépourvus des récepteurs sensibles aux odeurs humaines... De quoi donner espoir à ceux qui ont perdu à la loterie des « peaux à moustiques » !

Guillaume JACQUEMONT est journaliste à Pour la Science.



Pour réagir aux articles : [courrier@pouirlascience.fr](mailto:courrier@pouirlascience.fr)

ou directement sur les pages correspondantes du site [www.pouirlascience.fr](http://www.pouirlascience.fr)

### ✓ CHAUFFER LES PANNEAUX SOLAIRES ?

L'article *Des polymères pour les panneaux solaires* (*Pour la Science* n° 415, mai 2012, [http://bit.ly/415\\_panneaux\\_solaires](http://bit.ly/415_panneaux_solaires)) indique qu'« dans un semi-conducteur, l'agitation thermique peut suffire à faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Pourquoi alors ne pas convertir le rayonnement solaire par l'intermédiaire d'une surface chauffante posée sur un semi-conducteur ? »

Christophe Limousin

### → RÉPONSE DE FRANÇOIS CARDINALI

C'est un problème de rendement. La chaleur de la lumière solaire (des photons infrarouges principalement) peut en effet conduire à une augmentation de la conductivité, mais à des niveaux très faibles. Le calcul de la proportion des états d'énergie qui peuvent être peuplés à une température donnée livre un résultat décevant pour des valeurs proches de la température ambiante voire à des températures supérieures, vers 200 ou 300 °C, où le problème de la stabilité des composés commence à se poser.

Il est plus rentable de transformer l'énergie thermique du Soleil en chaleur accumulée dans l'eau (chauffe-eau thermique), ou pour fabriquer de l'électricité, en concentrant la chaleur accumulée par une grande surface réfléchissante sur un fluide caloporteur résistant à de très hautes températures (des sels fondus, par exemple), lequel sert ensuite à transformer de l'eau en vapeur pour entraîner des turbines (centrale solaire). Le rendement de tels systèmes est limité à une trentaine de pourcents, mais il reste très supérieur au rendement théorique du dispositif que nous proposons.

### ✓ LA MAUVAISE FILE À PILE OU FACE

Parmi les applications mathématiques de la *malédiction de la mauvaise file*, traitée par Jean-Paul Delahaye dans le numéro de mai 2012 de *Pour la Science* ([http://bit.ly/415\\_mauvaise\\_file](http://bit.ly/415_mauvaise_file)), il faut citer celle de William Feller, contenue dans *An Introduction to Probability Theory and its Applications*, voir *mon* comme deux fois

d'attente parallèles au jeu de pile ou face (pile, la file de gauche avance d'un cran ; face, c'est la file de droite), la loi de probabilité des intervalles entre deux retours à l'origine (files au même niveau) est la distribution stable de Paul Lévy d'exposant  $-1/2$ . La probabilité qu'une file finisse par attraper l'autre est bien égale à 1, mais le temps d'attente moyen est infini ! Ainsi, un conducteur qui voit que l'autre file le dépasse doit parfois attendre très longtemps avant de la rattraper. En outre, il ne sert à rien de changer de file, puisque dans le jeu de pile ou face, il n'y a pas de mémoire.

Alexandre Canet

### → RÉPONSE DE JEAN-PAUL DELAHAYE

C'est une remarque intéressante. Cependant, je ne la trouve pas totalement convaincante, car, dans ce modèle, par symétrie, une fois que j'ai doublé une voiture, l'espérance du temps d'attente avant qu'elle me rattrape est elle aussi infinie et donc de rattraper me donner l'impression que je suis dans la bonne file, ou au moins compenser exactement l'impression provoquée par les voitures qui me doublent et dont l'espérance du temps d'attente pour qu'elles me rattrape est infinie. Le fait que je n'observe pas les voitures que je double alors que j'observe les celles qui me doublent crée une dissymétrie déjà évoquée dans l'article.

### ✓ DES VIRIONS DANS LE NOYAU

Dans l'article *Les virus géants, vestiges d'organismes cellulaires* (*Pour la Science* n° 415, mai 2012, [http://bit.ly/415\\_claverie](http://bit.ly/415_claverie)), j'ai été étonné de voir sur le schéma de répllication d'un virus classique que le virion (la particule virale complète, avec sa capsid et son matériel génétique) est assemblé directement à l'intérieur du noyau de la cellule infectée. Comment cela fonctionne-t-il et quels virus sont concernés ?

François Ferré

### → RÉPONSE DE JEAN-MICHEL CLAVERIE

Un bon exemple est celui des virus de la famille de l'herpès, qui ne disposent pas de leur propre

machinerie de transcription. Ils font donc synthétiser leurs ARN messagers dans le noyau des cellules infectées. Une fois synthétisés, ces ARN sortent du noyau pour être traduits sur les ribosomes du cytoplasme. Les protéines virales ainsi produites sont réintroduites dans le noyau, où a lieu l'assemblage des nouvelles particules virales. Enfin, celles-ci ressortent du noyau, en entourant d'ailleurs d'une couche de membrane nucléaire « décorée » de protéines virales qui serviront à l'attachement aux futures cellules à infecter. Ce processus nécessite donc un va-et-vient incessant entre le noyau et le cytoplasme.

La majorité des virus infectent des bactéries ou des archéobactéries, et ne sont pas concernés par la production de virions dans le noyau cellulaire, puisque ces hôtes n'ont pas de noyau ! Quant aux virus géants, qui fonctionnent avec « l'usine à virions » cytoplasmique décrite dans le même schéma, ils forment un sous-ensemble des virus à ADN double brin infectant des cellules eucaryotes. Ils sont donc très minoritaires, bien que nous ne connaissions pas assez la biodiversité du monde viral pour effectuer un comptage précis.

### ✓ 3D, NE PAS PENCHER LA TÊTE !

Une précision peut être apportée à l'article *Cinéma, la conquête de la 3D* (*Pour la Science* n° 416, juin 2012, [http://bit.ly/416\\_cinema3d](http://bit.ly/416_cinema3d)) : une fois en face de l'écran et pendant toute la durée du film, le spectateur ne doit pencher la tête ni à gauche ni à droite, car la fusion stéréoscopique à partir d'images en deux dimensions prises à l'horizontale exige que la droite passant par les yeux reste parallèle à celle passant par les objectifs. Si ce n'est pas le cas, les images se trouvent alors trop hautes ou trop basses par rapport au plan formé par les axes optiques des yeux, sans pouvoir ainsi fusionner obliquement. Cette précaution avait été déjà indiquée en 1957 dans la sixième édition de l'ouvrage

*La technique photographique*, de L. P. Clerc (éditions Paul Montel).

Thierry Garçon



Astrophysique

# SUPER SUPERNOVAE

Avishay Gal-Yam

Certaines étoiles extrêmement massives finissent leur vie dans des explosions parmi les plus puissantes de l'Univers, déclenchées en partie par la production d'antimatière dans leur cœur.

UNE SUPERNOVA déclenchée par la production d'antimatière serait sans doute très spectaculaire vue depuis une planète en orbite. Cependant, tous les observateurs seraient rayés de la carte !



## L'ESSENTIEL

✓ Ces dernières années, plusieurs supernovae – des explosions d'étoiles – se sont révélées plus puissantes et plus durables que toutes celles observées auparavant.

✓ Les étoiles à l'origine de ces supernovae faisaient une centaine de masses solaires. Or on pensait que des étoiles aussi massives n'explosaient pas.

✓ Certaines de ces supernovae pourraient avoir été déclenchées par la création de paires particule-antiparticule.

✓ Les premières étoiles de l'Univers, extrêmement massives, ont peut-être explosé par un mécanisme similaire.

M i 2005 l'une des tentatives d'un des deux télescopes géants de l'observatoire américain *Keck*, à Hawaï, s'achève. Un dispositif d'optique adaptative, qui corrige automatiquement les effets de la turbulence atmosphérique, permet à l'instrument de produire des images aussi nettes que celles du télescope spatial *Hubble*. Shrinivas Kulkarni, de l'Institut de technologie de Californie (*Caltech*), presse alors les jeunes chercheurs de son organisme, dont je fais partie, à demander du temps d'observation sur ce télescope, avant que la communauté des astronomes prenne conscience des nouvelles performances et que la concurrence pour obtenir un créneau ne devienne trop intense.

Sur ses conseils, je me suis associé avec mes collègues postdoctorants Derek Fox et Doug Leonard pour mener une étude qui n'avait auparavant été réalisée qu'avec *Hubble*: la traque des progéniteurs de supernovae. En d'autres termes, nous voulions savoir à quoi ressemblent les étoiles qui explosent juste avant qu'elles n'explosent.

On sait depuis longtemps quelles étoiles ont fini leur vie en explosant en supernova. Il s'agit, d'une part, des « naines blanches » étoiles qui peuvent être victimes d'une explosion thermonucléaire suite à l'accrétion d'une grande quantité de matière arrachée à une étoile compagnon ; et, d'autre part, des étoiles massives, de plus de huit masses solaires environ, qui s'effondrent sur elles-mêmes sous leur propre poids. Les étoiles bleues et très brillantes par exemple, vivent quelques millions d'années avant d'exploser en supernovae. Nous comprendrions mieux le processus de supernovae s'il était possible de le voir se dérouler intégralement et en direct, mais hélas, scruter une étoile donnée en attendant qu'elle explose n'est pas réaliste.

Nous n'avons obtenu qu'une seule nuit d'observation sur le *Keck*, en novembre 2005. Heureusement, les cieux nous furent favorables. Cette étude a conduit à de nouvelles idées sur la taille limite que sont susceptibles d'atteindre les étoiles, et sur la façon dont ces géantes meurent.

Jusqu'à là, on pensait que si les étoiles massives explosaient en supernovae, ce n'était pas le cas des étoiles extrêmement massives de l'ordre de la centaine de masses solaires. Celles-ci dégagent tellement d'énergie qu'elles éjectent dans l'espace une bonne partie de leur masse sous forme d'un vent stellaire intense, s'amenuisant ainsi progressivement. En fait, d'après les

modèles théoriques, dans les conditions de l'Univers actuel, ces vents stellaires puissants devraient même bloquer la croissance de telles étoiles et les empêcher de devenir hypermassives : on pensait qu'une étoile ne pouvait dépasser une centaine de masses solaires environ.

Mais suite à nos observations, nous sommes arrivés à la conclusion qu'il existe aujourd'hui des étoiles d'au moins 140 masses solaires, et que leur vie s'achève dans des explosions parmi les plus énergétiques de l'Univers. Certaines de ces étoiles explosent par un mécanisme totalement différent des supernovae que l'on connaissait jusqu'ici. Ce processus, nommé supernova par création de paires, implique la création d'antimatière au centre de l'étoile.

En outre, la mort cataclysmique de ces étoiles géantes nous renseigne sur la façon dont les premières étoiles de l'Univers ont explosé et ont dispersé les éléments lourds qu'elles avaient synthétisés, semant ainsi les graines des soleils et des planètes actuels.

## Déricher une aiguille dans une botte de foin

Durant notre créneau sur le télescope *Keck*, nous espérons observer une supernova active et, partant de là, consulter les archives du télescope *Hubble* pour retrouver une image de l'étoile avant son explosion. Il fallait donc observer une supernova située dans une des nombreuses galaxies photographiées par *Hubble*. La difficulté pour retrouver ensuite le progéniteur de la supernova sur ces images est de déterminer laquelle des étoiles, parmi les milliards que comporte une galaxie, est celle qui a explosé. Une tâche bien plus dure que dénicher une aiguille dans une botte de foin !

Pour espérer y parvenir, il faut mesurer les données de la supernova avec une extrême précision. Avant l'arrivée des systèmes d'optique adaptative, une telle précision n'était possible qu'avec le télescope *Hubble* lui-même. Et même ainsi, la recherche est si ardue que les astronomes n'avaient réussi à identifier avec certitude que trois précurseurs de supernovae.

Parmi les supernovae visibles à cette époque, nous en avons sélectionné une nommée SN 2005gl. Certains ont sans doute considéré que c'était un mauvais choix, les équipes qui recherchent des précurseurs de supernovae explorent typiquement un rayon d'environ 60 millions d'années-lumière. Or SN 2005gl était

## L'AUTEUR



Avishay GALYAM est directeur de recherche à l'Institut Weizmann de Rehovot, en Israël.

plus de trois fois plus loin, à environ 200 millions d'années-lumière. Pour que nous puissions repérer le précurseur de SN 2005gl dans les images de *Hubble*, il aurait fallu que cette étoile soit parmi les plus lumineuses jamais observées.

Les chances de succès étaient faibles, mais notre pari fut payant. Après avoir mesuré la position de SN 2005gl avec les données du *Keck*, nous avons examiné la position correspondante sur les images prises par *Hubble* avant l'explosion, et nous avons vu quelque chose qui ressemblait à une étoile, sans en avoir la certitude. Si c'était une étoile unique, sa luminosité, de l'ordre de un million de fois celle du Soleil, suggérerait qu'elle atteignait 100 masses solaires. Cependant, comme il était généralement admis qu'un tel poids lourd ne pouvait pas exploser, il était beaucoup plus vraisemblable que le point lumineux corresponde à un groupe d'étoiles, les plus petites. Les données ne pouvaient pas exclure cette possibilité.

## Trop lumineuse pour être normale

Les choses en étaient là quand une découverte surprenante, en 2006, m'a conduit à penser que non seulement les étoiles géantes pouvaient exploser en supernovae, mais également que cela se déroulait d'une façon étonnante.

Par un nuit couverte au *Keck*, une brève accalmie a laissé entrevoir quelques étoiles. Faute de mieux, j'ai décidé d'observer la supernova la plus brillante du moment, un événement d'une intensité inhabituelle dénommée SN2006gy, découverte huit jours plus tôt par Robert Quimby, de l'Université du Texas. À l'aide d'un petit télescope, j'ai pu l'observer pendant 15 minutes avant que la trouée dans les nuages ne se referme définitivement.

L'analyse des données que j'avais obtenues par l'équipe de Eran Ofek, du *Caltech*, a révélé que SN2006gy était la supernova la plus brillante jamais repérée jusqu'alors. Une étude indépendante conduite par Nathan Smith, alors à l'Université de Californie à Berkeley, est parvenue à une conclusion analogue.

Aucun des types de supernova que nous connaissions n'était capable de dégager une telle luminosité. SN2006gy se trouvait dans une galaxie que *Hubble* n'avait pas observée, si bien que nous n'avions aucun moyen d'étudier l'étoile progé-

trice. Mais à en juger par la violence de l'explosion, cet astre faisait au moins 100 masses solaires.

Nous avons envisagé plusieurs explications possibles. Deux étaient moins improbables que les autres. Selon la première, la luminosité extrême est due au rayonnement thermique de l'onde de choc formée lorsque les débris éjectés par l'explosion ont rattrapé le vent stellaire précédemment émis par l'étoile, plus lent.

La seconde explication fait intervenir la radioactivité. Durant l'explosion d'une étoile massive en supernova, l'énergie et la quantité colossale de neutrons dégagés entraînent la synthèse d'éléments plus lourds que le fer (les éléments plus légers sont créés par les réactions de fusion dans le cœur durant la vie de l'étoile). Ces nouveaux éléments sont, pour l'essentiel, synthétisés sous forme d'isotopes radioactifs riches en neutrons, qui se désintègrent ensuite en isotopes plus stables. L'explosion géante à l'origine de SN2006gy a peut-être synthétisé une énorme quantité de

matériau radioactif, dont la désintégration aurait libéré de l'énergie dans le nuage de débris en expansion, le faisant ainsi rayonner par fluorescence. Mais comment expliquer l'énorme quantité de matériau radioactif nécessaire à ce scénario ?

Pour creuser cette dernière piste, nous avons passé en revue les travaux théoriques. Dans une série d'articles écrits à la fin des années 1960, un trio de jeunes astrophysiciens, Gideon Rakavy, Giora Shaviv et Zalman Barkat, avait proposé un nouveau mécanisme d'explosion stellaire.

Les étoiles brillent parce que leur cœur est suffisamment dense et chaud pour que les atomes y fusionnent en libérant de l'énergie. C'est cette énergie qui s'oppose à l'attraction gravité de l'étoile et la maintient en équilibre. La masse initiale contrôle l'essentiel de la physique et de l'évolution d'une étoile. Celle-ci passe par des phases stables au cours desquelles les éléments du cœur fusionnent en éléments plus lourds – phases qui peuvent durer des milliers, voire des milliards d'années, selon la façon dont la combustion agit sur la température et la pression du cœur – entrecoupées de brèves périodes de contraction du cœur.

L'hydrogène initial fusionne ainsi en hélium, qui est ensuite converti en carbone, qui devient lui-même de l'oxygène, donnant progressivement à l'étoile une structure en couches concentriques (en partant

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Gal-Yam *et al.* Supernova 2007bi as a pair-instability explosion, *Nature*, vol. 462, pp. 624-626, 2009.

A. Gal-Yam et D. C. Leonard, A massive supernova progenitor as the progenitor of the supernova SN 2005gl, *Nature*, vol. 458, pp. 865-868, 2009.

M. Heydari-Belabadi, L'énigmatique formation des étoiles massives, *Pour la Science*, n° 359, septembre 2007, <http://bit.ly/359-etoiles-massives>

W. Hillebrandt *et al.* Supernovae des explosions énigmatiques, *Pour la Science*, n° 336, octobre 2005, <http://bit.ly/336-supernovae>

R. Larson et V. Bromm, Les premières étoiles de l'Univers, *Pour la Science*, n° 293, mars 2002.

d'oignon». À partir de l'oxygène, l'évolution diffère selon la masse initiale de l'étoile.

Dans une étoile d'une dizaine de masses solaires, le cycle de fusion se poursuit : l'oxygène forme du silicium, qui fusionne à son tour en fer. Ce dernier étant un élément très stable, le cycle s'arrête, et le cœur de fer inerte grossit. Lorsqu'il devient trop massif, il s'effondre sur lui-même, provoquant l'explosion de l'étoile : c'est la supernova par effondrement classique.

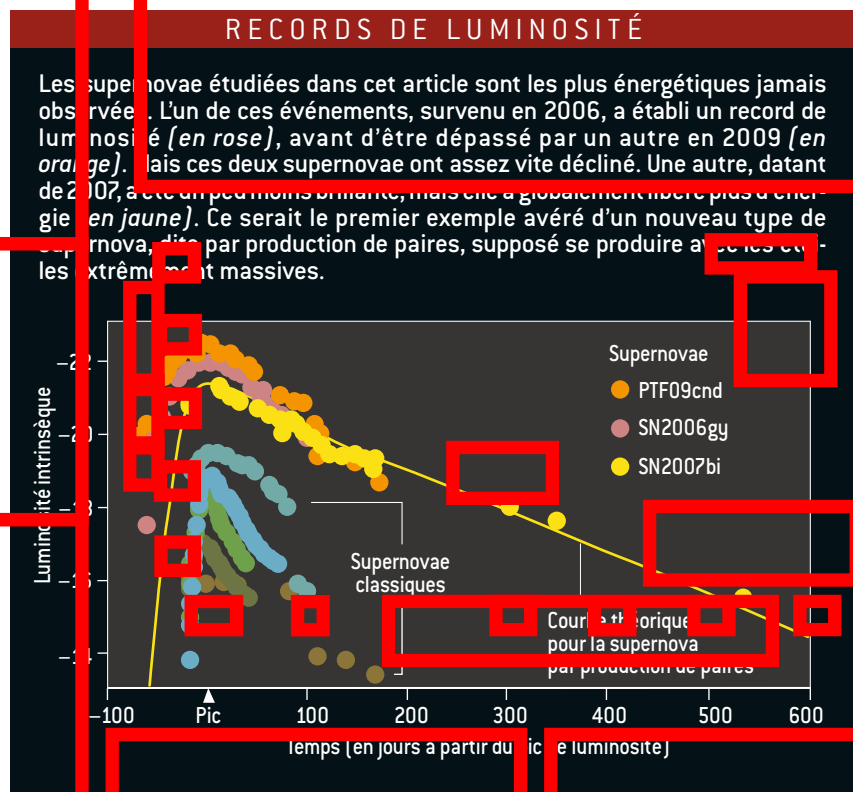
Pour les étoiles hypergéantes, de plus de 100 masses solaires, l'évolution est différente. G. Rakavy et ses collègues ont calculé que, lorsque le cœur est parvenu au stade de l'oxygène, il se contracte modérément et reste trop peu dense pour que sa fusion s'amorce. À la place, il se produit un phénomène que les physiciens appellent production de paires.

Dans le cœur, les noyaux atomiques portés à haute température émettent des photons très énergétiques, dans le domaine gamma du spectre électromagnétique. Or, en vertu de l'équivalence entre masse et énergie, deux photons gamma qui interagissent peuvent se convertir spontanément en une paire composée d'un électron et de son antiparticule, le positron. Lorsque cette production de paires électron-positron devient importante, l'essentiel de l'énergie des photons est capturée sous forme de matière, qui exerce une pression de radiation beaucoup plus faible que les photons. La pression au sein du cœur chute alors brutalement ; il devient instable et commence à se contracter rapidement, jusqu'à ce que la densité soit suffisante pour amorcer la fusion de l'oxygène.

## Chute fatale de pression

Or lorsque ce seuil est franchi dans un cœur en train de s'effondrer et non dans un cœur stable, l'allumage de la fusion est explosif : la fusion libère de l'énergie, qui chauffe davantage encore le matériau, ce qui accélère les réactions de fusion, et ainsi de suite. La réaction s'emballe. L'étoile peut brûler tellement d'oxygène en quelques minutes que l'énergie libérée est supérieure à toute l'énergie potentielle de gravitation de l'étoile. Sous cet afflux d'énergie, l'étoile est entièrement disloquée et sa matière expulsée dans l'espace dans une explosion cataclysmique.

Contrairement aux supernovae classiques, où le cœur s'effondre,



devenue une étoile à neutrons, voire un trou noir, une supernova par production de paires ne laisse rien derrière elle. Tout ce qui reste de l'étoile est un nuage d'éjectats qui se dilate rapidement, très riche en éléments ayant été synthétisés au cours de la déflagration.

Selon les travaux théoriques d'autres équipes, les supernovae par production de paires doivent engendrer, entre autres éléments lourds, une énorme quantité de nickel 56. C'est un isotope radioactif, qui se désintègre en cobalt 56 en environ six jours, puis en fer 56, non radioactif, en 77 jours. La désintégration du nickel 56 pourrait expliquer l'intense luminosité de la supernova SN2006gy ?

Bien que la théorie des supernovae par production de paires soit cohérente, il était généralement admis que ce processus n'avait plus cours dans la nature. Selon les théories de formation stellaire, les étoiles hypermassives ne devraient pas voir le jour dans l'univers actuel. Le milieu interstellaire est riche en éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium. Or en présence de ces éléments lourds, les nuages moléculaires s'effondrent plus vite et les étoiles s'allument plus précocement, soufflant le gaz résiduel qui les entoure trop tôt pour espérer devenir très massives. Et même si des étoiles massives se for-

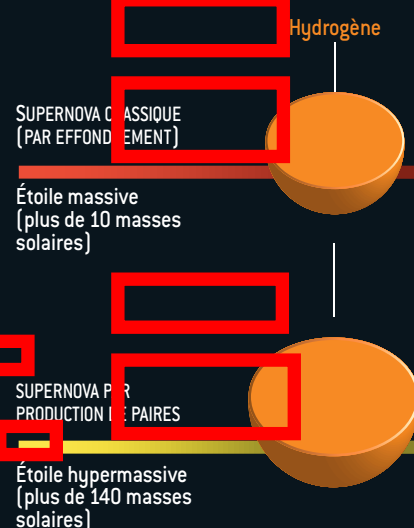
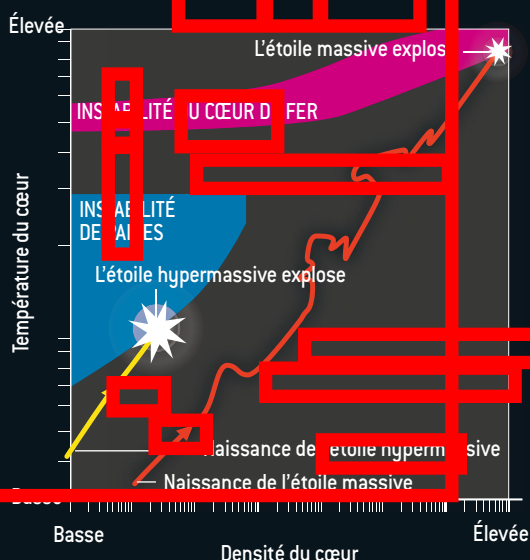
maient, elles dégageraient un vent stellaire si puissant qu'elles perdraient rapidement la majeure partie de leur masse, si bien que leur cœur ne deviendrait jamais assez massif pour que se déclenche l'instabilité des paires.

La situation était différente durant le premier milliard d'années après le Big Bang. Les premières étoiles qui se sont formées à partir du gaz primordial, composé presque exclusivement d'hydrogène et d'hélium, étaient sans doute de véritables monstres de plusieurs centaines de masses solaires. En effet, en l'absence d'éléments lourds, la dissipation d'énergie par un nuage de gaz qui se contracte est moins efficace, si bien que la masse minimale pour former une étoile est plus élevée. Ces étoiles primordiales ont peut-être explosé sous forme de supernovae par production de paires.

Pendant ce temps, la supernova record SN2006gy suscitait l'intérêt des astrophysiciens. De façon ironique, bien qu'elle nous ait poussés, nous et d'autres équipes, à réenvisager le modèle de production de paires, cette supernova s'est révélée dépourvue de la signature attendue pour une grande quantité de nickel radioactif, à savoir une forme particulière de la courbe d'évolution de la luminosité avec le temps.

## COMMENT MEURENT LES ÉTOILES MASSIVES

Ce sont les réactions de fusion nucléaire dans leur cœur qui font briller les étoiles. À mesure qu'une étoile vieillit, son cœur devient plus chaud et plus dense (ci-contre) et produit des éléments de plus en plus lourds, qui forment des couches en pelure d'oignon (à droite). Une étoile assez massive, par exemple de 20 masses solaires (traits rouges), finit par avoir un cœur assez dense pour s'effondrer, ce qui entraîne l'explosion du reste de l'étoile. Mais dans une étoile hypermassive, de 140 masses solaires ou plus (en jaune), avant que le cœur ne devienne trop dense, la conversion de photons en paires électron-positron entraîne une réaction de fusion explosive qui désintègre entièrement l'étoile dans une déflagration colossale.



Dans une supernova par production de paires, l'essentiel de la luminosité ne devrait pas provenir de l'explosion elle-même, mais de la décroissance radioactive du nickel 56 et des autres isotopes créés durant l'explosion. La radioactivité est un processus bien connu, et les désintégrations des différents éléments se produisent à un rythme prédictible.

Mais SN2006gy, après avoir brillé pendant de nombreux mois, s'est éteinte brusquement, de façon incompatible avec une émission majoritairement d'origine radioactive. En fin de compte, SN2006gy n'était probablement pas une supernova par production de paires, et la première hypothèse, celle de l'onde de choc, s'est imposée. Néanmoins, ce coup manqué avait éveillé ma vigilance à l'égard des signatures de supernovae par production de paires.

Quelques mois plus tard, en 2007, Peter Nugent, du Laboratoire national Lawrence Livermore de Berkeley, avec qui je venais de commencer un « tour de chauffe » pour un vaste programme de recherche de supernovae, m'envoya un spectre totalement inhabituel, provenant d'une supernova nommée SN 2007bi.

Les raies d'absorption et d'émission des différents éléments, visibles à des longueurs d'onde spécifiques dans le spectre d'une étoile, nous renseignent sur la composition chimique

de celle-ci (plus précisément, du matériau qui émet la lumière). Le spectre de la supernova SN 2007bi suggérait que les différents éléments étaient présents dans des proportions inhabituelles et que l'objet était extrêmement chaud.

### Une supernova qui refuse de s'éteindre

J'ai continué à suivre l'évolution de cette supernova. Elle était environ dix fois plus lumineuse qu'une supernova ordinaire, et sa luminosité décroissait très lentement. Cette source refusait tout simplement de s'éteindre, et les jours devenaient des semaines, puis des mois. J'étais convaincu que c'était enfin un exemple de supernova par production de paires. Mais il me fallait davantage de données pour étayer cette interprétation.

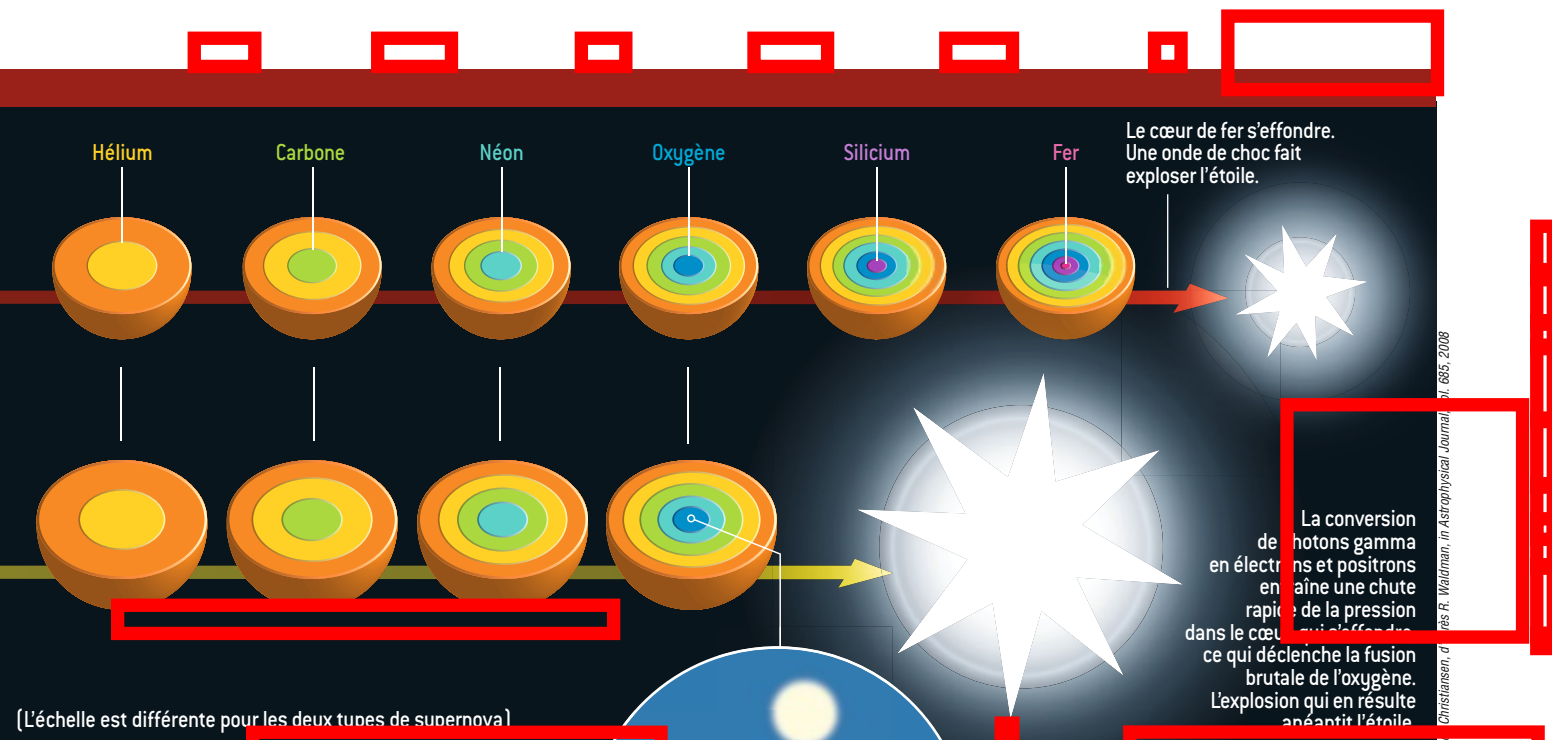
Tout au long de 2007 et de 2008, avec plusieurs collaborateurs, nous avons continué à observer SN 2007bi à l'aide des télescopes de l'Observatoire du mont Palomar. La supernova mit plus d'un an avant de s'éteindre enfin. J'ai alors demandé à mes collègues de Caltech Richard Ellis et Shrinivas Kulkarni de l'observer avec les télescopes du Keck.

En octobre 2008, après que j'ai intégré l'Institut Weizmann, en Israël, S. Kulkarni et son étudiant en thèse Mansi Kasliwal m'ont envoyé le dernier spectre en date de

SN 2007bi. Une première analyse a révélé un résultat stupéfiant : cette explosion avait synthétisé une quantité de nickel 56 équivalente à cinq à sept fois la masse du Soleil ! C'était dix fois plus que ce qu'on avait jamais vu auparavant, et cela correspondait exactement à ce que l'on attendait d'une explosion de supernova par production de paires.

Firmin 2008, je me suis rendu à l'Institut Max Planck d'astrophysique de Garching, en Allemagne, pour travailler avec Paolo Mazzali, un spécialiste de l'analyse des spectres de supernovae qui pourrait vérifier les résultats de mes analyses approximatives. P. Mazzali détenait aussi des spectres obtenus avec le très grand télescope VLT de l'Observatoire européen austral au Chili. Après de longs calculs, l'analyse de P. Mazzali livra des résultats cohérents avec les miens : plusieurs masses solaires de nickel 56 avaient été synthétisées et l'abondance relative des éléments correspondait aux prédictions des modèles de production de paires.

Bien qu'assez confiant dans le fait d'avoir identifié une supernova par production de paires, j'ai ensuite mis les données de côté pendant quelques mois pour me consacrer sur la supernova à l'origine de tout cela : SN 2005gl. Quand nous avons trouvé fin 2005 ce que nous pensions être son précurseur, nous ne pouvions pas affirmer qu'il s'agissait d'une étoile unique plutôt que d'un groupe d'étoiles.



les. Mais trois ans plus tard, la supernova avait disparu, et nous pouvions faire un test simple : si notre candidat n'était pas l'étoile qui avait explosé, il devait être encore présent. D. Leonard et moi avons mené de nouvelles observations avec *Hubble* pour le vérifier. Et à la fin de 2008, nous en eûmes la certitude : l'étoile avait disparu. Ainsi, le précurseur de SN 2005gl était bien, selon toute vraisemblance, une étoile très lumineuse et très massive, semblable à Eta Carinae, une des géantes bleues les plus massives de la Voie lactée.

Ainsi, la théorie classique selon laquelle les étoiles hypergéantes perdent l'essentiel de leur masse avant de pouvoir exploser est contredite par au moins un cas. Des étoiles très lumineuses et très massives existent bien et explosent avant d'avoir perdu toute leur masse. Et si la théorie de la perte de masse est incorrecte, peut-être existe-t-il encore aujourd'hui des étoiles géantes qui exploseront un jour sous forme de supernovae par production de paires.

J'étais maintenant prêt à revenir sur le cas SN 2007bi et à y chercher des signes probants de supernova par production de paires. Avec toute une équipe, nous avons examiné cet événement sous tous les angles imaginables. Nous avons analysé en détail les spectres recueillis et l'évolution de la lumière émise, comparé les prédictions des anciens modèles d'explosion stellaire et les observations. En 2009, nous les



analyses convergèrent vers une même conclusion : l'explosion la plus plausible est que SN 2007bi est une supernova par production de paires.

## Des événements rares, mais possibles

Depuis lors, trois autres événements qui seraient de bons candidats au titre de supernovae par production de paires ont été détectés. Ce type de supernova semble excessivement rare, peut-être de l'ordre de 1 sur 10 000 supernovae, et concernerait des étoiles d'au moins 140, voire 200, masses solaires. Ces explosions sont les plus énergétiques que l'on connaisse, et elles sont le siège d'une énorme production d'éléments chimiques. Elles mériteraient le qualificatif d'« hypernovae ».

Un des aspects fascinants de ce nouveau type de supernova est qu'elle nous laisse entrevoir l'Univers primordial. Les étoiles de première génération étaient de plusieurs centaines de masses solaires. Certains de ces poids lourds ont sans doute

explosé par production de paires. Ainsi, les cousins éloignés de certaines supernovae d'aujourd'hui ont peut-être été les premières explosions à ensemercer l'Univers en éléments lourds.

Nos travaux suggèrent non seulement l'existence d'un nouveau mécanisme d'explosion stellaire, mais ils signifient aussi que les étoiles hypermassives, bien que rares, existent dans l'Univers actuel, contrairement à ce que l'on pensait. Cela implique que l'enrichissement du milieu interstellaire en éléments lourds par les générations successives d'étoiles ne constitue pas un aussi grand frein à la croissance des étoiles que ne le pensaient les astrophysiciens.

Le programme d'étude des supernovae que P. Nugent et moi avons commencé à préparer en 2007 est maintenant en cours, et s'appelle *Palomar Transient Factory*. Nous recherchons de nouveaux exemples d'explosions par production de paires. De fait, ce programme a permis de trouver l'un de nos derniers candidats, qui ressemble beaucoup à SN 2007bi. À mesure que les données s'accumulent, nous améliorons notre compréhension de ces explosions. Les instruments de demain, tel le télescope spatial *James Webb*, seront sans doute capables de voir des supernovae par production de paires très lointaines ; et peut-être, un jour, la fin violente des premières étoiles formées dans l'Univers ?

# L'origine préhistorique

Marc AZÉMA

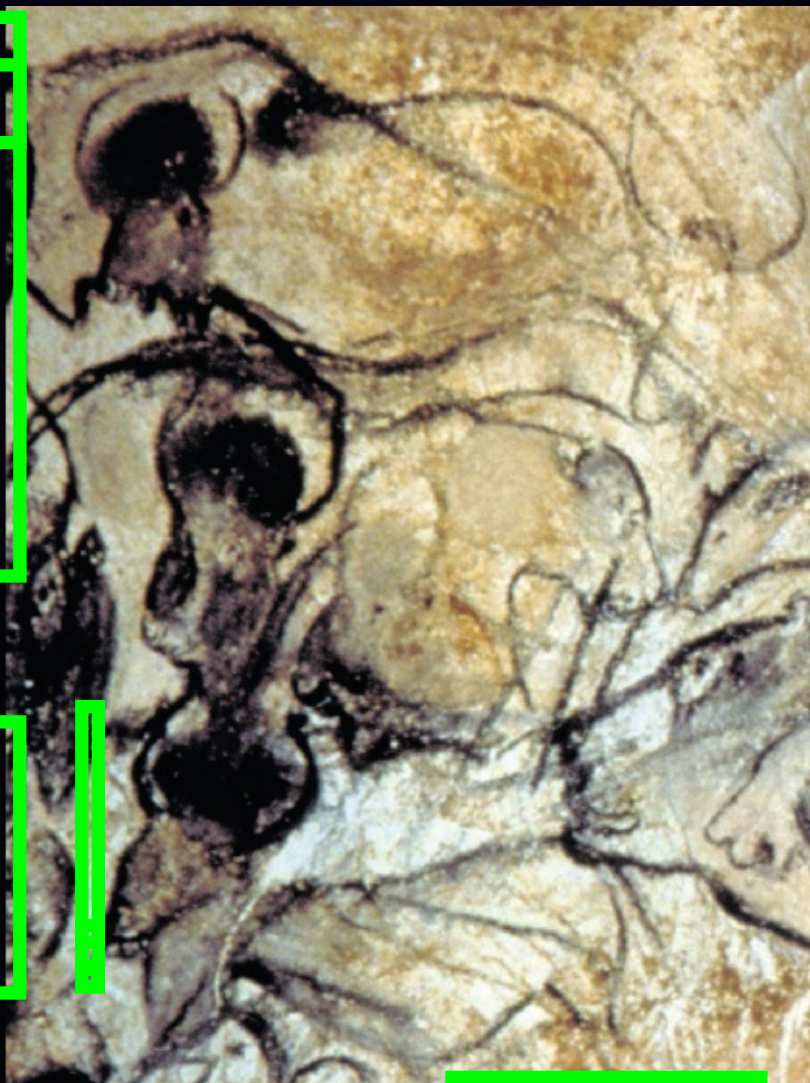
La représentation du mouvement, notamment avec les bandes dessinées et le cinéma, peut sembler une invention récente de l'humanité. Mais cette impression est trompeuse : comme nous le verrons, l'examen de nombre d'œuvres pariétales de la Préhistoire montre que les artistes du Paléolithique maîtrisaient déjà des techniques graphiques d'animation. Un premier exemple est le panneau des Lions de la grotte Chauvet (*ci-contre*). Toutes les images paléolithiques ne sont pas aussi dynamiques. Leur degré d'animation varie d'un site à l'autre, et suivant le style et les intentions de l'artiste. Il peut être nul à l'échelle d'un seul animal, mais l'absence apparente de mouvement est à relativiser. En effet, les animaux figurés, qu'ils soient statiques ou pas, participent souvent à une action collective qui, elle, est animée. Il arrive aussi qu'ils prennent vie lorsqu'on les observe sous un éclairage dynamique. À l'évidence, les artistes de la Préhistoire ont cherché à donner vie aux animaux qu'ils représentaient.



## LE PANNEAU DES LIONS

Ces lions peints sur une paroi de la grotte Chauvet sont pleins de vie. En observant cette scène de chasse, on perçoit les mouvements de chaque lion, celui de la meute et même celui, apeuré, du troupeau de bisons qui s'enfuit... On constate avec étonnement que l'artiste talentueux qui, il y a 32 000 ans, a peint cette fresque, ne pouvait concevoir de ne pas en montrer l'essentiel : le mouvement des prédateurs en train de charger. Et pour cela, il a employé les mêmes conventions graphiques que les artistes d'aujourd'hui.

Jean Coltes, équipe scientifique de la grotte Chauvet



Parce qu'ils représentaient des êtres animés – des animaux –, les artistes de la Préhistoire ont inventé, plus de 35 000 ans avant l'animation cinématographique, les techniques graphiques qui nous sont toujours familières.

# du cinéma



Le panneau des Lions de la grotte Chauvet (Ardèche, 32 000 ans avant notre ère)



Scène du puits de la grotte de Lascaux (Dordogne, 19 000 ans avant notre ère)

## LA REPRÉSENTATION DU MOUVEMENT

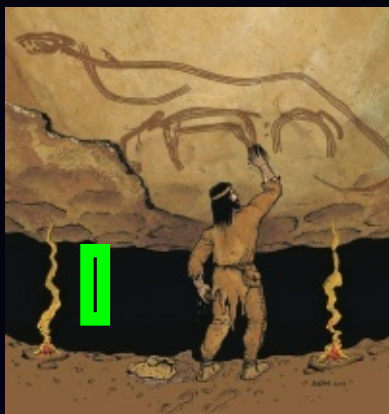
La « scène du puits » de la grotte de Lascaux montre un bison éventré sur le point de transpercer un homme en érection, une tête d'oiseau est figurée sur un bâton (un propulseur ?) situé à côté de lui ; d'épigamiques signes qui pourraient être des armes l'accompagnent le tout...

Cette scène est exceptionnelle, car, à de très rares exceptions près, les artistes chasseurs préhistoriques ne représentaient pas d'hommes (l'animal est d'ailleurs bien dessiné, mais pas l'homme !). Ils dessinaient plutôt des bisons, chevaux, cerfs, rennes, bouquetins, rhinocéros, mammouths, lions et autres ours, bref de grands mammifères de leur environnement. Ces images ont longtemps été perçues comme des symboles à combiner pour construire un langage unique et figé dans le temps. Or nous nous sommes rendu compte que les intentions de nos lointains artistes allaient bien au-delà : loin de se contenter de symboliser les animaux, ils voulaient aussi en représenter les mouvements et les émotions associées, telle la colère de ce bison... Plutôt que de symboles, nous préférons donc parler de modèles, et adoptons dans nos analyses une approche résolument naturaliste.

Ainsi, depuis 15 ans, nous analysons en détail les modèles animaux représentés sur les parois afin d'y mettre en évidence des mouvements. Pour les identifier et les classer, nous utilisons une approche éthologique : après avoir observé des animaux vivants comparables aux modèles paléolithiques, étudié leur biologie, leur anatomie et leur kinématique, nous recherchons les mêmes comportements dans les modèles préhistoriques. Nous avons ainsi mis en évidence bien plus de mouvements qu'on ne pensait. L'animation de compositions spectaculaires telles que la salle des Taureaux de Lascaux ou le panneau des Chevaux de Chauvet est perceptible d'emblée par la présence de phases rapides du mouvement animal (galop, saut...). Cependant, dans les mêmes grottes, d'autres compositions portent des expressions dynamiques subtiles, mais significatives, de mouvement animal. Ainsi, une posture d'oreille, de bouche ou de queue, qui suggèrent une animation, ne seront pas immédiatement perçues par l'observateur actuel. Pour une femme ou un homme préhistorique, en revanche, l'animation était évidente. Pour eux, percevoir et comprendre les comportements des animaux qu'ils côtoyaient ou chassaient au quotidien, même les plus subtils, était vital.



## ANIMER LES IMAGES



Marc Azéma

À l'issue d'une recherche effectuée en 2003, nous avons montré que 41 pour cent des animaux paléolithiques des grottes ornées sont représentés en mouvement. À cette proportion élevée, s'ajoute celle des animaux apparemment statiques, mais potentiellement animés.

La lumière vacillante des torches, des lampes à graisse et autres feux utilisés par les artistes paléolithiques avait en effet un certain pouvoir d'animation. La lumière se réfléchissant de façon variable sur les volumes irréguliers des parois, les représentations pariétales statiques prenaient vie, ce qui participait à leur mise en scène. Ci-contre, la restitution d'une scène de peinture à la Baume Latrone (voir ci-dessous) donne une idée de la faiblesse des éclairages à la flamme des peintres préhistoriques.

Par ailleurs, il faut souligner qu'une caverne n'était pas un musée, où l'on contemplerait les œuvres toujours sous le même angle frontal, mais un espace où des observateurs en mouvement apercevaient les images pariétales sous des angles variés. Cette perception dynamique et tridimensionnelle des parois ornées participe à leur animation. C'est pourquoi, après avoir contemplé des milliers d'œuvres dans ces conditions, nous sommes parvenus à la conclusion que la plus grande partie du bestiaire pariétal devait être animée pour les artistes préhistoriques.

## L'AUTEUR



Marc AZÉMA, préhistorien et réalisateur de films, est chercheur associé au CNRS (UMR 5608, TRACES, Toulouse-Le Mirail), et membre de l'équipe scientifique qui étudie la grotte Chauvet.

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Azéma, *La préhistoire du cinéma*, France, 2011.

M. Azéma, *L'art des cavernes en animation*, tomes 1 et 2, Errance, 2009 et 2010.

N. Aujoulat, *Lascaux. Le geste, l'espace et le temps*, Seuil, 2004.

J. Clottes et al., *La grotte Chauvet : l'art des origines*, Seuil, 2001.



Marc Azéma, avec l'aimable autorisation de la mairie de Russan-Sainte Anastasie

Lions et mammouths du Grand plafond de la grotte de la Baume Latrone (Gard, 32 000 ans avant notre ère)



Jean Clottes, équipe scientifique de la grotte Chauvet

Bison à huit pattes de la grotte Chauvet (32 000 ans avant notre ère)

## LA DÉCOMPOSITION DU MOUVEMENT

Les artistes de la Préhistoire ont poussé très loin la représentation du mouvement. Certains d'entre eux, sans doute plus doués que les autres, ont introduit une dimension supplémentaire dans leurs œuvres, le temps. Capturer un moment de vie, un instantané ne leur suffisait pas : ils ont aussi cherché à exprimer graphiquement le déroulement du mouvement animal dans le temps en le décomposant.

Les artistes de la Préhistoire ont inventé pour cela deux processus : d'une part, la réalisation d'images successives ; d'autre part, leur juxtaposition. L'invention et l'emploi de ces deux techniques prouvent qu'ils avaient pressenti l'existence de cette propriété majeure de la

perception visuelle qu'est la persistance rétinienne.

La rétine de l'œil humain a en effet la propriété de conserver une image lumineuse pendant environ 50 millisecondes après que l'image a disparu. Cette particularité explique que notre œil perçoive les mouvements de façon continue et non pas saignée lorsqu'il capte une succession d'images instantanées. Décrit pour la première fois par Ptolémée au II<sup>e</sup> siècle, puis par Al-Hazen au XI<sup>e</sup> siècle, ce phénomène était manifestement aussi exploité au cours de la Préhistoire : parmi les milliers de figures animales que compte l'art paléolithique, plusieurs dizaines montrent des décompositions d'un

mouvement digne d'une bande dessinée. Parfaitement maîtrisé par l'artiste, cet effet visuel est le plus souvent exploité pour suggérer la trajectoire des membres, les queues sont représentées aux phases extrêmes de leur mouvement afin de mieux signifier par exemple le cycle du galop ou celui du trot.

Très étonnant, ce type d'images se rencontre dans les plus grands sites d'art paléolithique : Chauvet, Lascaux, Altamira, Les Trois-Frères ou Foz Côa, ainsi que dans l'art mobilier, par exemple celui des grottes de la Vache ou de la Vache, autrement dit à toutes les périodes de l'art des cavernes et sur tous les supports conservés.

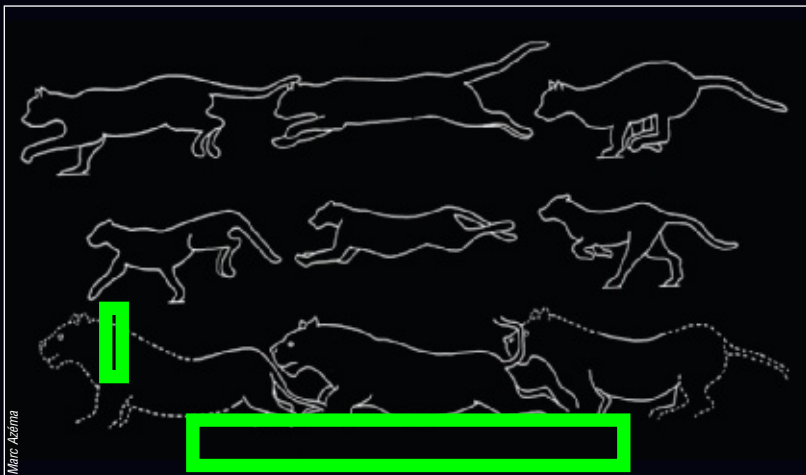


C. Fritz et G. Tosello





Fragment de la frise des lions de la grotte de la Vache (Ariège, 11 000 ans avant notre ère)



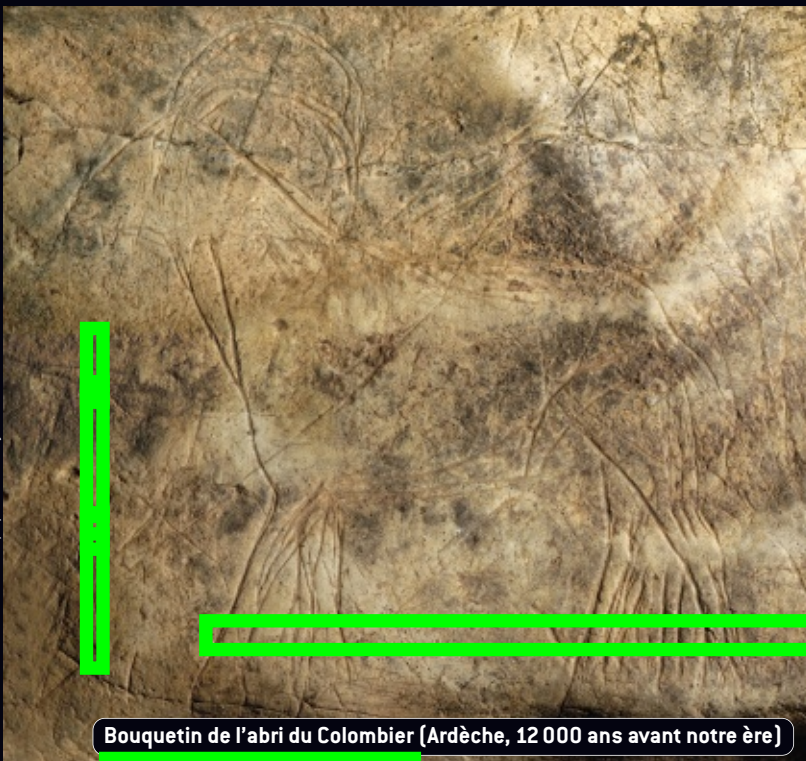
Parfois, les effets de décomposition sont poussés encore plus loin, pour en quelque sorte raconter une action. Ainsi, pour représenter un bouquetin en marche, l'auteur d'une gravure de l'abri du Colombier, en Ardèche (12 000 ans avant notre ère) a choisi de traiter ses membres en contours multiples, de sorte que le mouvement est suggéré, ou plutôt représenté en détail par toute une série d'images successives.

Trouvée dans la grotte de la Vache en Ariège, qui a livré plus de 200 œuvres d'art mobilier (bois et os de rennes gravés), la frise des lions est encore plus significative. D'après son étude attentive, en effet, la succession de félins gravés sur cette cote de bovidé explicite probablement la course d'un seul individu.

De telles conventions graphiques sont immédiatement intelligibles, comme pour le lecteur actuel de bandes dessinées ou celui du *Codex atlanticus* de Léonard de Vinci qui décompose le vol animal.

La contemplation de pareilles images déclenche dans le cerveau un réflexe de reconstitution du mouvement évoqué. Manifestement, les artistes préhistoriques voulaient créer des animations mentales, c'est-à-dire exploiter cette activité réflexe du cerveau pour évoquer, par exemple, non pas trois félins indépendants, mais la course d'un seul et même lion ! Comme nous l'avons déjà signalé, le spectateur préhistorique de ces images pouvait en accentuer l'effet par le jeu des éclairages, par exemple en balayant la séquence avec la lumière de sa flamme...

## DES SÉQUENCES NARRATIVES

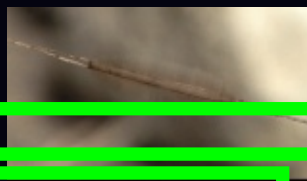


Bouquetin de l'abri du Colombarier (Ardèche, 12 000 ans avant notre ère)





Passé simple



## LE TOUT PREMIER... PRÉCINÉMA

Puisque animer leurs images d'animaux était si essentiel pour les artistes préhistoriques, ont-ils aussi inventé le cinéma animalier ? Non, mais presque. Dès 1991, nous avons pensé que des mécanismes primitifs conçus pour animer les images devaient avoir existé dans la Préhistoire. L'observation d'une petite plaquette en schiste abandonnée il y a quelque 15 000 ans dans la grotte d'Isuritz, dans les Pyrénées-Atlantiques, nous en a alors fourni un début de confirmation.

Cet objet d'époque magdalénienne porte sur chaque face une image de renne représenté dans une position différente : debout d'un côté, couché sur l'autre. La succession rapide des deux images, par rotation de la main ou à l'aide d'un cordage, semblait pouvoir produire un effet de recombinaison montrant l'animal se coucher, puis se relever.

En 2007, le travail d'un ami paléontologue expérimentateur – Florent Rivière – nous a permis de confirmer cette hypothèse. F. Rivière a fait apparaître par l'essai que toute une catégorie d'objets jusque-là considérés comme des boutons ou des pendeloques, pouvait en fait avoir eu une tout autre fonction. En effet, plusieurs rondelles en os provenant de l'art magdalénien de Dordogne et des Pyrénées portent sur chaque face des images correspondant à des phases successives du

mouvement d'un même animal. Après avoir obtenu des fac-similés de ces objets, F. Rivière a cherché comment les actionner pour animer l'animal représenté.

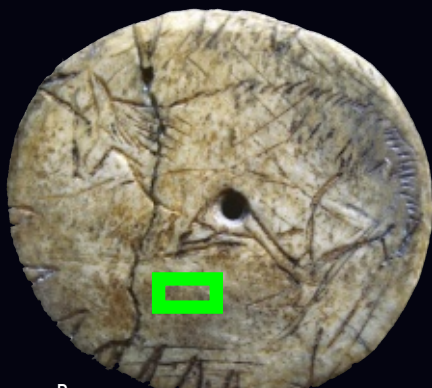
Nous nous sommes ainsi rendu compte que la rondelle « aux chamois » de l'abri de Laugerie-Basse pouvait, si l'on sait s'y prendre, être lancée sans grand effort dans un mouvement de rotation rapide. La manipulation implique de faire passer par la perforation centrale (ou périphérique) une corde torsadée puis de la tendre en la tenant de chaque côté à l'aide de la pince formée par l'index et le pouce (*ci-dessus*). Si on frotte alors la corde à la faveur d'un mouvement avant-arrière de ces deux doigts, la rondelle se met à pivoter très vite autour de la corde tendue, ce qui anime le chamois.

De tels jouets optiques qui exploitent le phénomène de la persistance rétinienne existent dans notre culture depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, c'est-à-dire depuis l'époque du précinéma... On les nomme des thaumatopes (du grec *thauma* signifiant « prodige » et *tropion* signifiant « tourner »). On pensait jusque-là que leur principe, l'ancêtre de celui de la caméra de cinéma, avait été inventé en 1825 par l'astronome anglais John Herschel. Il semble qu'il soit plus de 15 000 ans plus ancien...



Musée d'art et d'archéologie de la Dordogne

La rondelle aux chamois de l'abri de Laugerie-Basse (Dordogne, 15 000 ans avant notre ère)



Revers



## CLAP DE FIN !

Revenons un instant à la séquence de chasse léonine ouvrant l'article. Dans le contexte de la Salle du Fond de la grotte Chauvet, elle peut être mise en relation avec d'autres séquences mettant en scène les lions des cavernes. Une phase précédente est présente, où des lions à l'affût sont prêts à bondir sur leurs proies ; une phase suivante aussi, où un lion pose sa mâchoire sur la tête d'un bison comme pour le dévorer ; finalement, la même scène comprend une phase de pré-accouplement, où la copulation à venir – jamais vraiment représentée dans l'art pariétal – est suggérée par la posture des animaux.

Tout cela illustre une fois de plus ce que l'on saisit de mieux en mieux : les hommes paléolithiques ont utilisé l'image narrative pour célébrer des épisodes marquants du cycle de vie de leurs animaux-modèles, tels de grands rassemblements liés à la saison du rut, leurs déplacements saisonniers, leurs actes de prédation. La narration de tous ces épisodes marquants de la vie animale a pu, selon nous, refléter (symboliquement) dans leur esprit les aspects fondamentaux de leur propre existence (vie/mort). Par ce premier niveau

d'interprétation, nous avons voulu démontrer l'existence du premier néo-cinéma visuel de l'humanité, empreint de naturalisme mais dont la charge mythologique, voire symbolique, nous échappe (animisme ? chamanisme ? religion ?).

Le cinéma est aujourd'hui en mutation. D'une part, il explore et expérimente son avenir à travers des œuvres, telles qu'*Avatar*, qui convoquent toutes les innovations du virtuel, de la 3D et des jeux vidéo. D'autre part, il célèbre ses origines historiques avec des œuvres telles que *The artist* ou *Hugo Cabret*. Il pourrait en fait tout autant célébrer ses origines préhistoriques, puisque le spectacle des images pariétales, jeu d'ombres et de lumières associant narration graphique, animation séquentielle, chants et paroles, suggère une origine du septième art – ou tout au moins de ses concepts fondateurs, beaucoup plus ancienne qu'on ne le pensait. Dans cette perspective, l'invention de la photographie au XIX<sup>e</sup> siècle apparaît désormais comme l'ultime déclencheur nécessaire pour libérer enfin tous les films contenus en germe dans près de 400 siècles de traditions artistiques !

# Rendez-vous sur

POUR LA  
**SCIENCE**

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

■ Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.

■ Nouveau ! Écoutez nos entretiens audio ou téléchargez-les.

■ Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur [www.pourlascience.fr/newsletters](http://www.pourlascience.fr/newsletters)

■ Consultez les archives de tous nos magazines depuis 2004.

■ Accédez aux numéros numériques compris dans votre abonnement en créant votre compte.

■ Suivez notre actualité en direct :



<http://www.pourlascience.fr/rss>



<http://twitter.com/pourlascience>



<http://www.pourlascience.fr/pls-facebook>



À très bientôt sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr) !

# Guérir du SIDA ?

Depuis la première pandémie datée de 1981, le VIH (le virus de l'immunodéficience humaine) n'a cessé de se répandre. En 2009, 2,5 millions de personnes ont contracté le virus et 33 millions d'individus étaient infectés dans le monde. Les thérapies anti-VIH permettent aujourd'hui aux personnes séropositives de mener une vie normale et l'espérance de vie de ces personnes a considérablement augmenté grâce à ces traitements.

Toutefois, le virus reste latent dans des « réservoirs » – des cellules immunitaires disséminées dans de nombreux organes ou circulant dans le sang. Il risque de se réveiller à tout moment, lorsqu'une autre infection stimule le système immunitaire.

C'est pourquoi les traitements doivent être pris durant toute la vie.

Peut-on éviter cette contrainte ? Peut-on guérir du sida ? Deux stratégies complémentaires sont développées. L'une vise à renforcer les résistances du système immunitaire pour empêcher la multiplication du virus dans les cellules immunitaires et maintenir un niveau bas de virus chez le patient (voir Repousser les attaques du VIH, page ci-contre). L'autre a pour objectif d'éradiquer le virus des réservoirs, afin de l'éliminer de l'organisme (voir Éradiquer le VIH, quels obstacles ?, page 42).

Ces deux articles font le point sur les principes de ces stratégies, les progrès et les obstacles à franchir pour espérer une guérison. ■





# Repousser les attaques du VIH

Empêcher le VIH de pénétrer dans les cellules immunitaires en modifiant leur surface : telle est une des stratégies envisagées pour augmenter la résistance du système immunitaire au virus.

Carl June et Bruce Levine

## L'ESSENTIEL

✓ Le VIH infecte certaines cellules immunitaires en se liant à la protéine CCR5, située à leur surface.

✓ Certains individus ont hérité d'une mutation qui rend leurs protéines CCR5 non fonctionnelles, ce qui leur confère une meilleure protection contre le VIH.

✓ Par des techniques génétiques, des biologistes modifient les cellules immunitaires pour qu'elles ne produisent plus la protéine CCR5 fonctionnelle, ce qui les rend résistantes au VIH.

✓ Des études préliminaires sont en cours chez l'homme.

1. LE VIH (en rouge) se fixe sur des protéines à la surface des cellules immunitaires (en blanc).

En supprimant ces protéines de la surface, les biologistes espèrent rendre les cellules

En 2009, une équipe médicale de Berlin a publié les résultats d'une expérience unique qui a étonné tous les chercheurs travaillant sur le VIH (le virus de l'immunodéficience humaine). L'équipe allemande a prélevé de la moelle osseuse – la source des cellules immunitaires de l'organisme – d'un donneur anonyme naturellement résistant au VIH. Puis les immunologistes ont transplanté ces cellules chez un homme souffrant d'une leucémie et qui était séropositif depuis plus de dix ans. La transplantation de moelle osseuse est la thérapie utilisée pour soigner les patients atteints de leucémie ; l'équipe de Berlin espérait que cette transplantation apporterait aussi suffisamment de cellules immunitaires résistant au VIH pour contrôler l'infection du patient. Les résultats de la thérapie ont dépassé les espérances : le VIH n'était plus détectable chez ce patient, y compris dans les multiples tissus où il aurait pu se trouver en état dormant. Surpris, les chercheurs allemands ont attendu presque deux ans avant de publier leurs données.

Aujourd'hui, cinq ans après la transplantation, l'individu, surnommé le patient

Owen Gillier/Levine

de Berlin (il révéla ultérieurement son identité : Timothy Brown, de Californie), ne montrait toujours pas de signe de la présence du virus du sida – et ce, bien qu'il n'ait pas pris de médicaments antirétroviraux contre le VIH depuis la transplantation. Sur les quelque 60 millions de personnes infectées par le VIH depuis les années 1980, T. Brown est à ce jour l'unique individu qui semble présenter une disparition de l'infection.

Cette approche ne peut pas être utilisée à grande échelle pour de nombreuses

raisons, dont l'une – et non des moindres – est que le propre système immunitaire du patient doit être détruit lors d'une première étape. Mais ce succès inattendu a incité les biologistes du monde entier à rechercher des moyens plus sûrs et moins onéreux de doter les patients d'un nouveau système immunitaire résistant au VIH, semblable à celui que T. Brown a reçu. Un tel exploit pourrait d'empêcher le VIH de se répandre d'une cellule à l'autre dans l'organisme. Le système immunitaire modifié ne détruirait bien sûr pas le virus

dans toutes ses cachettes. En d'autres termes, par une approche inspirée du traitement de Berlin, pourrait-on éradiquer le virus et gérer du sida ?

Avec nos collègues, nous avons peut-être trouvé un tel moyen d'offrir aux patients séropositifs un système immunitaire semblable à celui du patient de Berlin. La procédure s'est révélée prometteuse en laboratoire, et nous effectuons les premiers essais cliniques sur un petit nombre de personnes infectées par le VIH. Nous ignorons encore si cette thérapie sera efficace, mais nos résultats préliminaires et le fait que le VIH ne soit pas réapparu chez le patient de Berlin sont des données encourageantes.

## Suractiver le système immunitaire

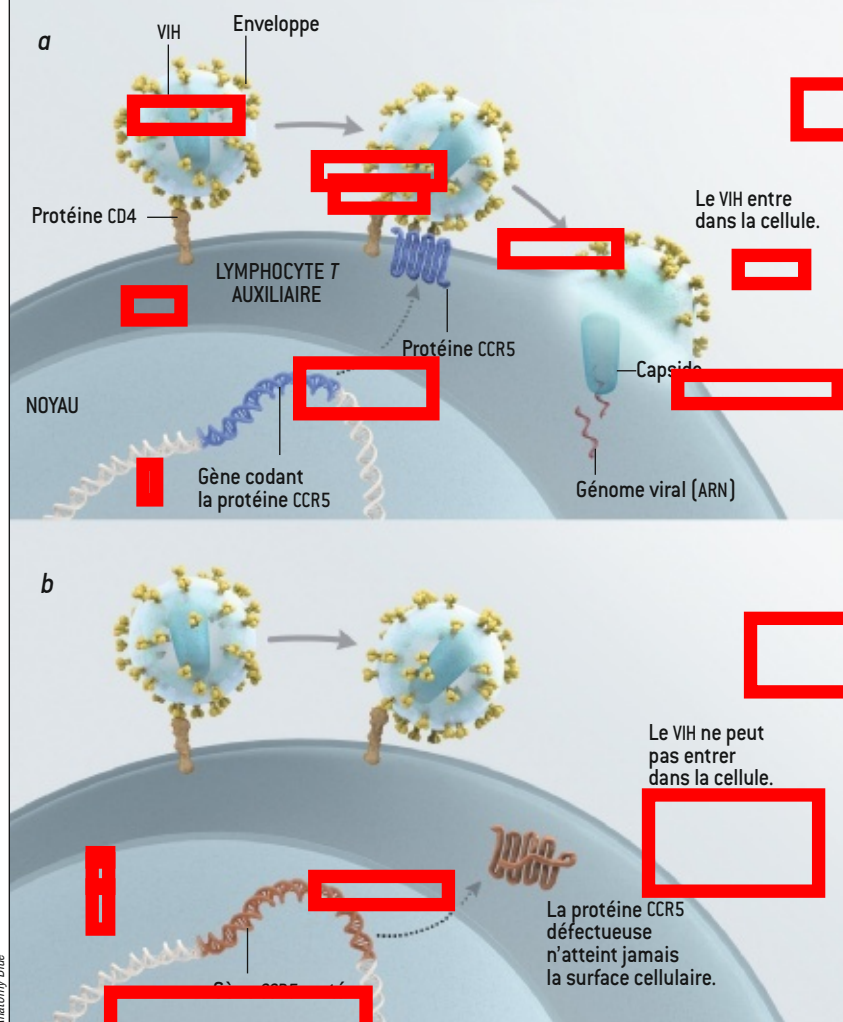
Notre approche s'appuie sur deux lignes de recherches visant des objectifs distincts, mais liés. D'une part, suractiver le système immunitaire pour augmenter son efficacité contre le VIH et, d'autre part, empêcher le VIH de pénétrer dans ses cellules favorites, les lymphocytes CD4+ ou lymphocytes T auxiliaires. Ces lymphocytes T particuliers sont à la réponse immunitaire ce que les demi-d'ouverture sont au rugby : ils coordonnent les interactions de nombreux types de cellules immunitaires. Quand le VIH infecte pour la première fois un lymphocyte T auxiliaire, il ne cause aucun dégât. Mais ultérieurement, quand la cellule immunitaire est activée pour combattre une infection en cours, elle se met à produire des copies du VIH en quantité. En outre, le VIH finit par tuer les lymphocytes T auxiliaires, réduisant la capacité du système immunitaire à combattre de nombreuses autres infections. À mesure que les lymphocytes T auxiliaires disparaissent, l'organisme a de plus en plus de difficultés à résister aux infections, jusqu'à ce que le sida – le stade terminal, marqué par des infections mortelles – s'installe.

À l'époque où les résultats sur le patient de Berlin ont été diffusés, des progrès avaient été faits sur les deux fronts – la suractivation du système immunitaire et la protection des lymphocytes T auxiliaires.

Depuis des années, les scientifiques qui étudient les cancers, ainsi que ceux qui travaillent sur les infections virales, recherchent des moyens de stimuler le système immunitaire – par exemple en prélevant

### COMMENT BLOQUER L'ENTRÉE DU VIH

Le VIH détruit le système immunitaire en ciblant des cellules clés, les lymphocytes T auxiliaires, par l'intermédiaire d'une protéine à leur surface, nommée CD4. Dans les années 1990, les scientifiques ont découvert que le VIH entre dans ces cellules en se fixant à une protéine située à leur surface, dénommée CCR5 (a). Néanmoins, quelques personnes résistent à l'infection par le VIH, car elles sont dépourvues d'un gène fonctionnel qui code la protéine CCR5. Les biologistes espèrent que la mise « hors service » du gène *CCR5* chez les individus séropositifs leur permettra de contrôler cette infection, voire de s'en débarrasser (b).



des lymphocytes *T* d'un patient, en les exposant à des substances qui les font se multiplier et devenir plus actifs contre le cancer ou les infections virales, et en réimplantant ces lymphocytes stimulés dans le corps du patient. Nous avons commencé à participer à ces travaux il y a 20 ans, dans l'actuel Centre médical militaire américain Walter Reed, à Bethesda. En nous inspirant des travaux de diverses équipes, nous avons cherché à améliorer les méthodes de croissance des lymphocytes *T in vitro*. À cette époque, on ne pouvait cultiver en laboratoire les lymphocytes *T* d'un donneur ou en utilisant des cocktails complexes de messagers chimiques ou en extrayant du sang du donneur un autre type de cellules, les cellules dendritiques, qui déclenchent la maturation des lymphocytes *T* et leur multiplication.

Nous pensions que nous pourrions simplifier ce processus à l'aide de cellules dendritiques artificielles : de minuscules billes magnétiques, légèrement plus petites que les lymphocytes *T*, auxquelles nous avions fixé, en surface, deux protéines qui imitaient celles portées par les cellules dendritiques. Mêlées aux lymphocytes *T*, ces billes se sont révélées très efficaces : réapprovisionnées en billes toutes les deux semaines environ, une colonie de lymphocytes *T* actifs se multipliait pendant plus de deux mois, augmentant  $10^{12}$  fois sa population.

Quand nous avons commencé à tester cette approche en utilisant des échantillons de sang prélevés sur des volontaires séropositifs, nous avons découvert, à notre grande surprise, que les lymphocytes *T* produits et réinjectés dans le corps des patients repoussent – temporairement – les assauts du VIH. Nous avons publié nos résultats en juin 1996 ; nous ignorions encore pourquoi notre méthode à base de billes magnétiques augmentait la résistance des lymphocytes *T* à l'infection par le VIH. Le mystère s'est éclairci quelques mois plus tard.

Pendant que nous mettions au point notre système de croissance des lymphocytes *T*, d'autres chercheurs ont découvert une faille importante dans l'attaque du VIH. Au tout début de l'épidémie du sida, des chercheurs avaient identifié un petit nombre d'individus qui semblaient résistants à l'infection par le VIH, malgré de multiples expositions au virus. Vers la fin 1996, plusieurs équipes ont montré que le VIH pénètre dans les cellules en se fixant à une protéine, le récepteur CCR5, présente

à la surface des lymphocytes *T* auxiliaires et de certaines autres cellules ; cette molécule est aussi probablement impliquée dans la réponse inflammatoire à une infection. À l'inverse, des personnes naturellement privées de cette protéine ne sont pas infectées.

## Bloquer l'entrée du VIH

Chez ces personnes, le gène qui code la protéine CCR5 est raccourci de 32 nucléotides (les lettres « A, T, C, G de l'« alphabet » du l'ADN) et la protéine synthétisée est incapable de rejoindre la surface cellulaire. Environ un pour cent des Caucasiens ont hérité de deux copies de ce gène défectueux, nommé *CCR5-Delta32*, ce qui rend leurs cellules résistantes à l'infection par le VIH. La mutation est plus rare chez les Américains, les Asiatiques et les Africains. Les individus présentant cette mutation paraissent en bonne santé, bien qu'ils puissent être plus sensibles au virus du Nil occidental. Les personnes qui n'ont hérité que d'une copie du gène *CCR5-Delta32* sont encore sensibles au VIH, mais le délai entre leur infection initiale et les stades ultérieurs de la maladie est en moyenne plus long.

De plus, l'étude de CCR5 a montré que la protéine peut être bloquée par des messagers chimiques nommés bêta-chimio-kines, qui la rendent indisponible pour le VIH. La découverte de ce blocage du récepteur CCR5 a conduit à toute une classe de médicaments anti-VIH. Toutefois, le blocage obtenu est incomplet : il est difficile de maintenir une couverture totale et continue de tous les récepteurs CCR5 sur toutes les cellules qui les portent. En outre, le VIH mute au fil de ses répliquations et échappe parfois au blocage.

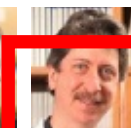
La découverte du rôle de la protéine CCR5 dans l'infection par le VIH nous a fourni un piste pour expliquer la résistance aux virus des lymphocytes *T* dont nous avions stimulé la croissance à l'aide de billes magnétiques : de fait, nous avons constaté que, lorsqu'ils sont activés par les billes magnétiques, les lymphocytes *T* stoppent leur production de protéine CCR5. Et sans cette protéine, le VIH ne peut pénétrer dans les cellules.

Arrivés à ce point, nous avons envisagé un nouveau traitement contre le VIH fondé à la fois sur notre méthode de stimulation des lymphocytes *T* auxiliaires et sur le rôle de CCR5 dans l'entrée du virus.

## LES AUTEURS



Carl JUNE est médecin et chercheur à l'École de médecine Perelman de l'Université de Pennsylvanie, aux États-Unis.



Bruce LEVIN est immunologiste dans la même institution, où il dirige la Cellule clinique et le Service de production de vaccins.

## En chiffres

- ✓ En 2009, 33 millions d'individus vivaient avec le VIH, dont 22,5 millions en Afrique subsaharienne.
- ✓ Chaque jour, 5 000 personnes développent une maladie liée au sida et 800 contractent le virus.
- ✓ Un tiers seulement des personnes nécessitant un traitement anti-VIH y ont accès.
- ✓ Les thérapies antirétrovirales augmentent l'espérance de vie des malades de plusieurs dizaines d'années quand elles sont commencées au tout début de l'infection et prises régulièrement.

En collaboration avec Kristen Hege et Dale Ando, de la Société de biotechnologie *Cell Genesys*, à San Francisco, nous avons mené des essais cliniques chez l'homme afin de nous assurer de l'innocuité de lymphocytes T génétiquement modifiés pour résister au VIH selon une approche inspirée des résultats sur CCR5- et multipliés à l'aide de nos billes magnétiques. Ces cellules se sont révélées sûres et ont survécu pendant plusieurs années après injection. Toutefois, la modification génétique que nous étudions n'avait qu'un effet modeste sur la réplication du VIH chez les patients. *Cell Genesys* a mis fin à ces travaux.

En 2004, alors que nous avions rejoint l'Université de Pennsylvanie, D. Ando nous proposa une deuxième expérience. Le Laboratoire *Sangamo BioSciences* avait mis au point une technique pour couper les brins d'ADN en des endroits précis. Cette méthode était différente des autres approches – et beaucoup plus efficace –, car elle ciblait une séquence de gène spécifique pour la modifier. Auparavant, on ne savait pas contrôler quels gènes, ou sections de gènes, étaient modifiés.

La technique de *Sangamo BioSciences* est basée sur l'utilisation de deux types de protéines produites par l'orga-

nisme des protéines qui se lient spécifiquement à l'ADN et une enzyme – une nucléase – qui coupe les brins d'ADN en deux. Les premières, dites protéines à doigts de zinc, se lient spécifiquement à l'ADN au cours de la transcription génétique, le processus au cours duquel l'information codée dans la molécule d'ADN est convertie en une molécule d'ARN, à partir de laquelle la protéine codée sera synthétisée. Ces protéines présentent de petits motifs structuraux stabilisés chacun par un atome de zinc. C'est par ces motifs qu'elles reconnaissent spécifiquement une région de l'ADN. L'homme produit environ 2 500 protéines à doigts de zinc différents, et chacune d'elles se lie à une séquence nucléotidique spécifique sur la molécule d'ADN.

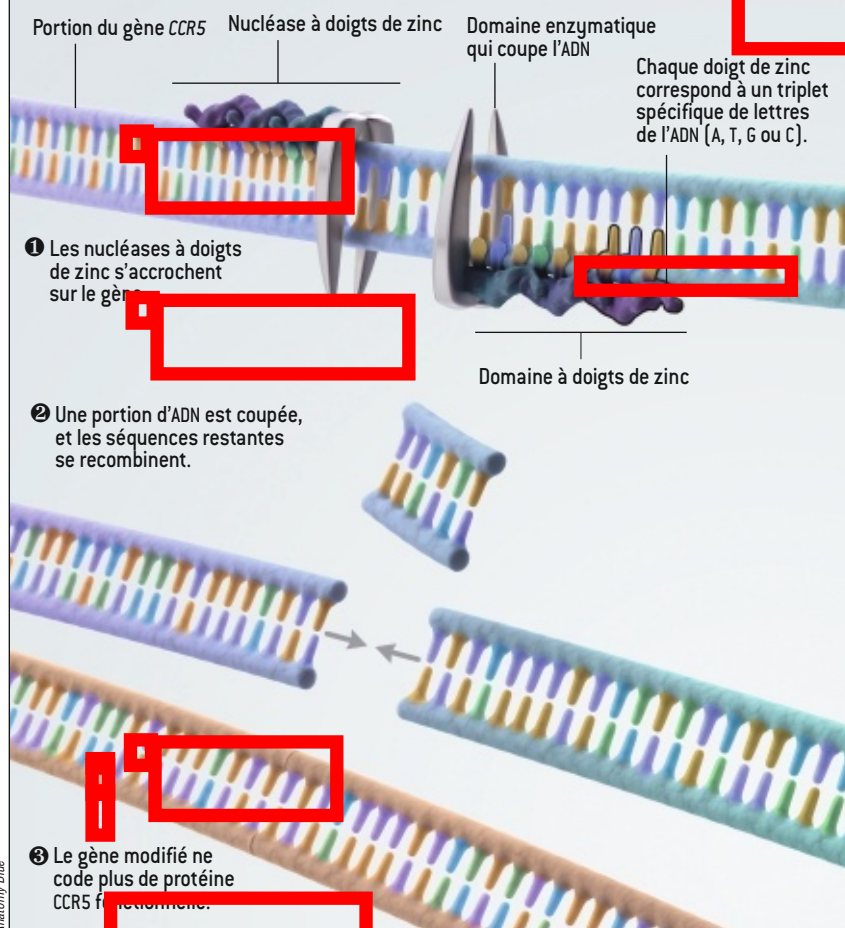
## Couper le gène CCR5

Depuis la découverte des protéines à doigts de zinc dans les années 1980, les biologistes ont mis au point un moyen de concevoir et de fabriquer ces molécules à la demande, qui se lient spécifiquement à toute séquence d'ADN présentant un intérêt – par exemple une portion du gène CCR5. D. Ando proposa que *Sangamo BioSciences* crée un ensemble « personnalisé » de réseaux à ADN à partir de protéines à doigts de zinc. Il s'agissait tout d'abord de produire des protéines à doigts de zinc qui s'attacheraient à chaque extrémité d'une séquence d'ADN que l'on souhaiterait supprimer. Puis, à chacune de ces protéines, on associerait une nucléase. La partie à doigts de zinc du complexe obtenu identifierait les sections de l'ADN à couper, et la nucléase couperait le matériel génétique. En mettant au point les paires adéquates de protéines à doigts de zinc, on espérait cibler uniquement la portion du gène CCR5 qui nous intéressait – sans endommager les autres gènes.

Puis la propre machinerie de réparation de la cellule prendrait la direction des opérations. Cette machinerie reconnaîtrait la coupure et réunirait les morceaux sectionnés d'ADN, supprimant quelques nucléotides ou en ajoutant d'autres. Grâce à ce processus de réparation, le gène coupé serait incapable de donner naissance à une copie fonctionnelle de la protéine CCR5. Les lymphocytes T ainsi modifiés seraient résistants au VIH. Multipliés grâce à nos billes magnétiques, ils seraient ensuite injectés aux patients.

### MISE HORS-SERVICE DU GÈNE CCR5

La protéine CCR5, localisée à la surface des lymphocytes T auxiliaires, est nécessaire à l'entrée du VIH dans ces cellules. Pour rendre résistantes au VIH des personnes séropositives, une stratégie pourrait consister à mettre hors service le gène qui code cette protéine grâce à des protéines de synthèse nommées nucléases à doigts de zinc. Le domaine dit à doigts de zinc d'une telle protéine se fixe à un endroit spécifique sur le gène, tandis que le domaine enzymatique – la nucléase – coupe l'ADN. Les mécanismes de réparation prennent alors la relève, reliant les plus longues pièces. Le gène ainsi constitué ne produit plus la protéine CCR5 et le VIH ne peut plus pénétrer dans les cellules ainsi modifiées.



L'entreprise était hasardeuse, mais valait d'être tentée. Non seulement le complexe à doigts de zinc ciblait spécifiquement la protéine CCR5, mais il agissait vite et ne laissait pas de trace dans la cellule.

Nous avions déjà obtenu l'autorisation de l'Office américain du contrôle pharmaceutique et alimentaire (FDA) et de l'Institut américain de la santé pour démarrer nos études d'innocuité chez l'homme quand les nouvelles concernant le traitement du patient de Berlin éclatèrent comme une bombe. La stratégie et les résultats encourageants de l'équipe médicale allemande, dirigée par Gero Hütter, confortaient notre démarche. Pour comprendre pourquoi retraçons son histoire. Séropositif depuis plus de dix ans, le patient se portait bien avec les médicaments antirétroviraux jusqu'à ce qu'il développe une leucémie myéloïde aiguë, indépendante de son infection par le VIH. Il avait subi une chimiothérapie, mais le cancer était revenu. Sans une transplantation de moelle osseuse, par laquelle le système immunitaire de la

personne transplantée (y compris tous les lymphocytes T) est remplacé par celui du donneur, il allait mourir.

Le patient a eu besoin de deux transplantations de moelle osseuse du donneur pour guérir de sa leucémie. À l'heure où nous imprimons, plus de cinq ans après l'opération et malgré l'absence de thérapie par médicaments antirétroviraux, les médecins n'ont détecté aucune trace de VIH dans son sang, son foie, ses intestins, son cerveau, ses tissus lymphatiques ou son plasma. Et ce, en utilisant les tests moléculaires les plus sensibles disponibles.

## JUSQU'À PRÉSENT, LES MÉDECINS

n'ont détecté aucune trace du VIH chez le patient de Berlin, et ce, en utilisant les tests moléculaires les plus sensibles disponibles.

Le monde entier ont essayé de reproduire l'expérience allemande et n'ont encore trouvé aucun individu présentant le bon ensemble de marqueurs HLA et de mutations de CCR5.

Personne ne sait si le VIH a vraiment été éradiqué de tous les tissus de l'organisme du patient. Le VIH a la capacité d'insérer ses gènes dans les chromosomes de diverses cellules, ce qui lui permet de demeurer à l'état dormant pendant de nombreuses années, puis de ressurgir lors d'une infection. Voir l'article de Ch. Rouzioux, A. Chénou et V. Avettand-Fénoël, page 42). A-t-il été éliminé de ces cellules chez le patient de Berlin, ce qui correspondrait à une guérison « de stérilisation » ? Ou en reste-t-il, mais son système immunitaire est suffisamment performant à présent pour repousser toute réapparition de l'infection ? Dans ce cas, le patient de Berlin serait « fonctionnellement » guéri. Quoi qu'il en soit, il n'a plus à prendre de médicaments antirétroviraux et semble débarrassé de

## Un patient en rémission

G. Hütter scruta les bases de données européennes de donneurs potentiels de moelle osseuse, recherchant un individu qui correspondrait aux marqueurs HLA (antigènes leucocytes humains) de son patient. Les marqueurs HLA constituent un groupe de protéines que le système immunitaire utilise pour distinguer ses propres tissus de ceux d'autres individus (le système d'histocompatibilité). Leur compatibilité entre le donneur et le receveur d'une transplantation est vitale pour empêcher les cellules transplantées de considérer le nouvel hôte comme un étranger et d'attaquer ses tissus (un phénomène appelé la réaction du greffon contre l'hôte) et pour empêcher un rejet par des composants résiduels du système immunitaire antérieur du patient.

G. Hütter ne s'arrêta pas là. Il espérait trouver quelqu'un possédant les « bons » marqueurs HLA, et dont les cellules porteraient aussi naturellement deux copies de la mutation *CCR5-Delta32*. Une transplantation de moelle osseuse d'une telle personne doterait un receveur séropositif d'un nouveau système

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

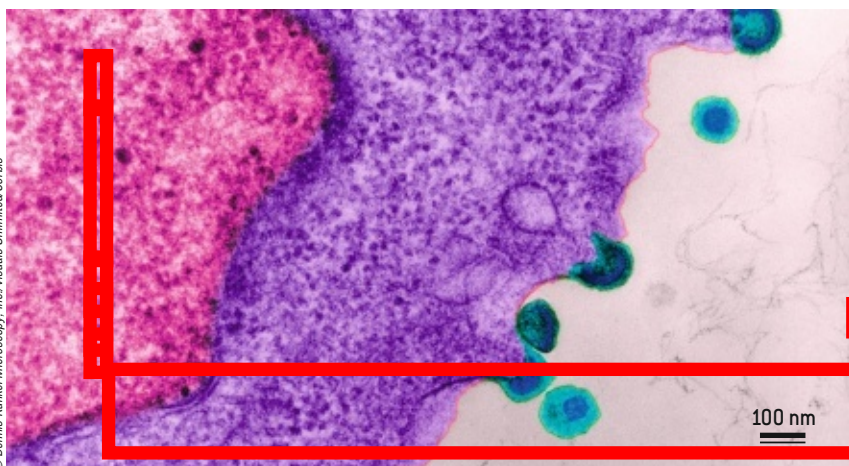
P. Cannon et C. Jones, *Chemokine receptor 5 knockout strategies*, *Current Opinions in HIV and AIDS*, vol. 6, n° 1, pp. 74-79, 2011.

T. Rosenbloom, *The man who had HIV and now does not*, *New York Magazine*, 9 mai 2011.

E. E. Perez et al., *Establishment of HIV-1 resistance in CD4+ T cells by genome editing using zinc-finger nucleases*, *Nature Biotechnology*, vol. 26, pp. 898-906, 2008.

Le sida, 25 ans après. Les grands défis, *Pour la Science*, n° 377, pp. 48-57, 2008.

S. O'Brien et M. Dean, *Pourquoi certaines personnes résistent au sida*, *Pour la Science*, n° 240, pp. 82-89, 1997.



**2. UN LYMPHOCYTE T INFECTÉ PAR LE VIH** (les points verts). Lorsque ces particules virales sont matures, elles se libèrent dans le milieu extracellulaire et infectent d'autres cellules.

tout virus détectable. Bien sûr, il doit toujours prendre des médicaments pour maintenir l'innocuité de sa transplantation de moelle osseuse, une correspondance entre systèmes HLA n'étant jamais parfaite, sauf entre de vrais jumeaux.

L'expérience allemande est cependant difficilement transposable à un autre patient. Non seulement la « bonne » combinaison du système HLA et des mutations génétiques chez le donneur et le receveur est rare, mais l'approche est coûteuse (une transplantation de moelle osseuse coûte au minimum 200 000 euros dans notre hôpital), requiert un protocole contraignant de chimiothérapie, une transplantation de moelle osseuse risquée et une grande quantité de médicaments antirejet à prendre toute la vie. En fait, le patient de Berlin a échangé un ensemble de problèmes – l'infection par le VIH et la leucémie – contre un autre : être le porteur d'une transplantation. La plupart des personnes qui, grâce aux médicaments anti-VIH, ont trouvé un certain équilibre de vie hésiteraient à faire un tel échange. Le patient de Berlin, lui, n'avait pas le choix, puisqu'il avait développé une leucémie mortelle.

La suppression, dans le système immunitaire transplanté, de la protéine CCR5 normale au profit de la version mutée n'était peut-être pas la seule raison de la disparition du VIH dans l'organisme du patient de Berlin. Peut-être le réservoir de particules de VIH dormant avait-il été vidé au cours des années de traitement antirétroviral. Ou peut-être le patient n'avait-il plus de VIH résiduel après la destruction de son système immunitaire original, lors de la préparation pour la

transplantation. Ou peut-être encore la réaction du greffon contre l'hôte dont a souffert le patient lors de son traitement a-t-elle détruit toutes les cellules infectées par le VIH restantes avant d'être contrôlée par un médicament ? Néanmoins, la suppression de CCR5 restait l'explication la plus vraisemblable, ce qui nous encourage à poursuivre nos expériences.

## Les essais cliniques sont en cours

Comme prévu, Sangamo BioSciences a mis au point un ensemble de nucléases à doigts de zinc qui ciblent une région proche de la séquence clé de 32 nucléotides du gène CCR5. Comme notre objectif était de mettre « hors service » la protéine CCR5, il n'était pas nécessaire de reproduire exactement la mutation CCR5-Delta32, du moment que la protéine résultante n'était pas fonctionnelle. Avec Elena Perez, alors postdoctorante dans notre laboratoire, nous avons montré, sur des cellules en culture et chez la souris, que l'infection par le VIH elle-même facilite la reconstitution du système immunitaire que nous avons mise au point. Même lorsque des lymphocytes T modifiés par les nucléases à doigts de zinc sont présents en faible quantité dans les cultures, ils repeuplent et stabilisent la population de lymphocytes T après exposition au VIH ; par contraste, les lymphocytes T non modifiés (qui contiennent encore la protéine CCR5 normale, responsable de l'entrée du VIH) sont détruits par le VIH. En d'autres termes, dans notre système, le VIH tue les lymphocytes T vulnérables, lesquels sont peu à peu rem-

placés par les lymphocytes T produisant la protéine CCR5 défectueuse, ceux-là même qui résistent au VIH.

Nos résultats préliminaires dans un essai d'innocuité chez l'homme sont aussi encourageants. En été 2009, sous la direction de Pablo Tebas, médecin à Philadelphie, un premier patient a reçu une injection de lymphocytes T modifiés. Depuis, nous avons traité 11 autres volontaires séropositifs, et Sangamo BioSciences mène une étude similaire sur la côte Ouest. Bien que ces études d'innocuité ne soient pas conçues pour démontrer l'efficacité du traitement, nous observons que le nombre de lymphocytes T auxiliaires, mesuré dans les tests sanguins, s'est accru chez tous les patients à ce jour, signe que ce traitement protège probablement les lymphocytes T. En outre, des lymphocytes T auxiliaires dépourvus de protéine CCR5 fonctionnelle ont été détectés dans les tissus lymphatiques de l'intestin et dans le sang. Or ces cellules ne peuvent provenir que des lymphocytes T modifiés réimplantés, ce qui suggère que les lymphocytes T modifiés et résistants colonisent progressivement l'organisme.

L'étape suivante consiste à tester la capacité des cellules immunitaires modifiées à combattre les particules de VIH déjà présentes dans l'organisme. Pour ce faire, nous utilisons une stratégie validée, bien que surprenante. Sous le contrôle de médecins, nous envisageons d'arrêter quelques mois les médicaments anti-VIH chez des volontaires pour suivre la progression du virus. Nous l'avons fait chez un de nos sujets traités, qui avait par ailleurs hérité d'un gène CCR5-Delta32 (ce qui lui confère un léger avantage) : après 12 semaines sans traitement anti-VIH, il ne présentait plus de trace de VIH dans le sang ou les tissus lymphatiques. Notre étude devrait s'achever courant 2013. D'autres essais cliniques visant à tester l'efficacité de cette nouvelle technique sont prévus. Si elle est couronnée de succès, cette approche serait moins coûteuse que la transplantation de moelle osseuse déficiente en CCR5 ou qu'une thérapie par médicaments anti-VIH à vie.

Il y a encore quelques années, une thérapie sûre, efficace et moins coûteuse, offrant un contrôle à long terme et sans médicaments du VIH, semblait inaccessible. Même si les nucléases à doigts de zinc ne sont pas synonymes de guérison, elles constituent une des approches les plus prometteuses depuis 30 ans pour stopper l'entrée du VIH dans les cellules.



# Institut de recherche pour le développement

Agir avec le Sud  
Acting with the South



## L'IRD met en œuvre des **recherches multidisciplinaires** dans la **zone intertropicale**

L'IRD conduit des **recherches** avec ses **partenaires du Sud** et les acteurs du développement dans trois grands domaines :

- **Santé** Maladies tropicales - Sida - Nutrition
- **Environnement et ressources**
- **Sociétés**



L'IRD met ses capacités d'**innovation** au service des partenaires du Sud

L'IRD participe au renforcement des capacités scientifiques du Sud par la **formation**



France • Méditerranée • Rom Com • Afrique • Asie • Amérique latine • Pacifique



Institut de recherche  
pour le développement

44 boulevard de Dunkerque  
CS 90009  
13572 Marseille Cedex 02  
France

Tél. +33 (0)4 91 99 92 00  
Fax +33 (0)4 91 99 92 22  
[www.ird.fr](http://www.ird.fr)

# Éradiquer le VIH Quels obstacles ?

S'il est si difficile de concevoir un traitement curatif du sida, c'est parce que le virus, le VIH, établit des réservoirs dormants dans tout l'organisme. En comprenant mieux comment ils s'installent, on devrait savoir mieux les détruire.

Christine Rouzioux, Antoine Chéret et Véronique Avettand-Fenoël

Le terme anglais *HIV cure* désigne un nouvel objectif en matière de traitement de l'infection par le VIH : éradiquer l'infection de l'organisme. Cet objectif constitue un défi, car les obstacles à l'éradication virale sont multiples. La récente mobilisation, depuis trois à quatre ans, d'équipes de biologistes et de médecins sur le sujet a permis d'identifier plusieurs approches thérapeutiques. Certes, des progrès thérapeutiques considérables ont été réalisés ces dernières années, mettant à disposition de nouvelles classes de médicaments de mieux en mieux tolérés, transformant la maladie en une infection chronique et bloquant la progression vers le sida. Cependant, aucune de ces combinaisons de médicaments n'est à même d'éliminer le virus de l'organisme, ce qui impose l'administration à vie des traitements.

Face à cette pandémie où tant de sujets infectés dans les pays du Sud n'ont même pas encore accès aux traitements actuels, les enjeux de l'éradication du VIH sont autant cliniques qu'économiques. Après avoir décrit les deux principaux obstacles à l'éradication du VIH, nous présenterons les approches développées pour

## L'ESSENTIEL

✓ Les traitements actuels contre le VIH bloquent la progression vers le sida, mais n'éliminent pas le virus de l'organisme.

✓ Le VIH reste en dormance dans tout l'organisme en intégrant son génome à celui de cellules immunitaires.

✓ Depuis quelques années, biologistes et médecins étudient les mécanismes de fonctionnement de ces « réservoirs » du VIH.

✓ Ils en déduisent de nouvelles pistes thérapeutiques visant à éradiquer le VIH de l'organisme.

sophiescapin.com

les vaincre, ainsi que les populations de patients qui pourraient en bénéficier.

Ces dernières années, plusieurs obstacles à l'éradication du VIH ont été mis en évidence, imposant la nécessité de rechercher de nouvelles pistes thérapeutiques. L'un d'eux tient au fait que l'infection par le VIH s'établit principalement dans les lymphocytes T mémoire, un sous-groupe des lymphocytes T CD4+ ou lymphocytes T auxiliaires. Les lymphocytes T CD4+ (qui portent à leur surface des protéines nommées CD4) jouent un rôle majeur lors d'une infection en alertant les cellules du système immunitaire et en orchestrant la défense. Parmi eux, les lymphocytes T mémoire ont gardé la mémoire d'anciennes agressions et sont prêts à se multiplier et à se mobiliser dès qu'ils détectent de nouvelles attaques des pathogènes « mémorisés ».

En infectant les lymphocytes T auxiliaires, le VIH atteint le cœur du système immunitaire. Il s'établit à l'état de dormance dans les cellules infectées en intégrant son génome au génome cellulaire. Les cellules conservent néanmoins toutes leurs propriétés immunitaires, car elles ne sont pas altérées par la présence du

génom viral tant que celui-ci reste au repos. En revanche, leur activation, c'est-à-dire leur mobilisation par une agression, déclenche la réplication du virus.

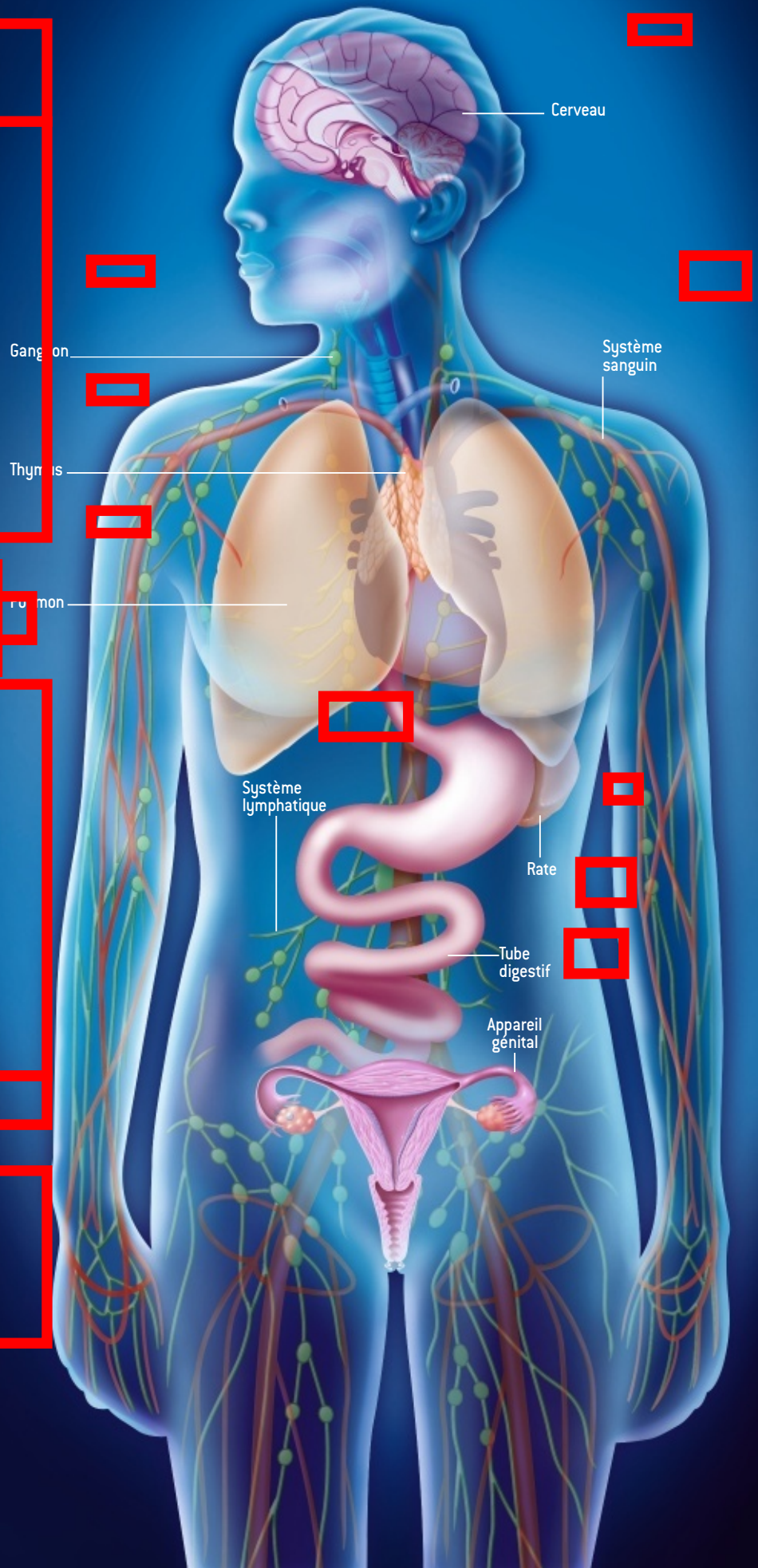
La difficulté est liée à la persistance des lymphocytes T mémoire. Alors que la plupart des lymphocytes T auxiliaires meurent dès qu'ils ne sont plus utiles, les cellules mémoire vivent longtemps dans l'organisme – jusqu'à plusieurs années pour certaines sous-populations. De plus, les lymphocytes ont la capacité de proliférer par division cellulaire, ce qui est essentiel pour maintenir la mémoire immunitaire au long cours et déployer les réactions immunitaires en cas d'attaque. Les lymphocytes T mémoire infectés ont donc une longue durée de vie et une bonne capacité proliférative. Ils constituent ainsi des «réservoirs» du VIH, prêts à se multiplier dès qu'ils reçoivent des signaux d'activation.

## Des réservoirs au cœur du système immunitaire

En définitive, ce sont les réactions immunitaires qui maintiennent les réservoirs du VIH et font augmenter le contenu viral : quand une cellule mémoire est activée par l'antigène correspondant, les gènes viraux le sont également, ce qui déclenche la réplication du VIH et la production de nombreuses particules virales, lesquelles infecteront de nouveaux lymphocytes. De plus, le système immunitaire peut amplifier la réponse immunitaire en déclenchant la prolifération des lymphocytes mémoire, une cellule mère produisant deux cellules filles identiques à la cellule mère. C'est sans doute un mécanisme important du maintien des réservoirs du VIH.

L'infection virale est donc particulièrement dynamique, car les cellules immunitaires

**1. NICHÉ DANS DES CELLULES** immunitaires – les lymphocytes T auxiliaires –, le VIH se dissémine rapidement dans l'organisme au gré de la circulation de ces cellules dans le sang. Les zones les plus contaminées sont le tube digestif, l'appareil génital, le cerveau et le système lymphatique ; dans un moindre degré, les poumons.



## LES AUTEURS

Christine RUZIOUX dirige le Laboratoire de virologie « Infection à VIH, réservoirs et pharmacologie des antirétroviraux », du CHU Necker-Enfants malades, EA 3620 Université Paris Descartes, Paris.

Antoine CHIFFRET et Véronique AVETIAND-FENOEL sont respectivement médecin chercheur et chercheur au sein de ce même laboratoire.

circulent dans l'organisme et sont disséminées dans tous les tissus. La quantité de cellules infectées dans les tissus lymphoïdes, les ganglions et le tube digestif est importante et la réplication y est élevée (voir la figure 1). La circulation sanguine favorise les échanges entre les différents tissus infectés. La quantification de la charge virale dans le sang et du nombre de cellules infectées permet d'évaluer pour chaque patient le degré d'infection de l'organisme.

Le rôle de l'activation est particulièrement important dans le tissu digestif, lequel est très altéré après la primo-infection, autrement dit juste après l'infection. Cela facilite la translocation bactérienne, c'est-à-dire l'entrée de bactéries dans l'organisme via la paroi intestinale, ce qui entretient l'inflammation et, par conséquent, la réplication virale (voir l'encadré ci-contre). Des lymphocytes T CD4+ infectés et des particules virales sont aussi présentes dans les poumons, la rate, le thymus et le cerveau. Enfin, l'infection virale est détectée dans les organes génitaux masculins et féminins, à l'état de cellules réservoirs ou de particules virales infectieuses à l'origine des contaminations par voie sexuelle. Sans compter que d'autres cellules de l'immunité – les cellules dendritiques et les macrophages – sont aussi infectées et participent à la dissémination de l'infection virale dans tous les tissus.

En d'autres termes, en infectant les cellules réservoirs, le virus colonise une niche où non seulement le protège, mais favorise sa persistance et sa multiplication, puis joue son rôle de pérenniser la mémoire immunitaire. Le virus finit par gagner la bataille. En détruisant les lymphocytes T CD4+, il entraîne la perte progressive des fonctions immunitaires, puis l'évolution vers le stade sida et le décès.

Les traitements antirétroviraux permettent de bloquer l'évolution vers la maladie et de restaurer un certain nombre de fonctions immunitaires et de stabiliser l'organisme. Plus le traitement commence tôt, plus le système immunitaire est atteint. Cependant, les traitements antirétroviraux ne permettent pas d'éradiquer les cellules infectées latentes. Ils bloquent la réplication du virus, mais ne peuvent en aucun cas atteindre le génome viral intégré dans le chromosome des cellules infectées au repos.

Un autre obstacle à l'éradication vient de la structure du provirus intégré au chro-

Un des principaux obstacles à l'éradication du virus est qu'il se multiplie et se dissémine au sein de l'organisme grâce aux réactions immunitaires que lui-même contribue à entretenir. Voici comment.

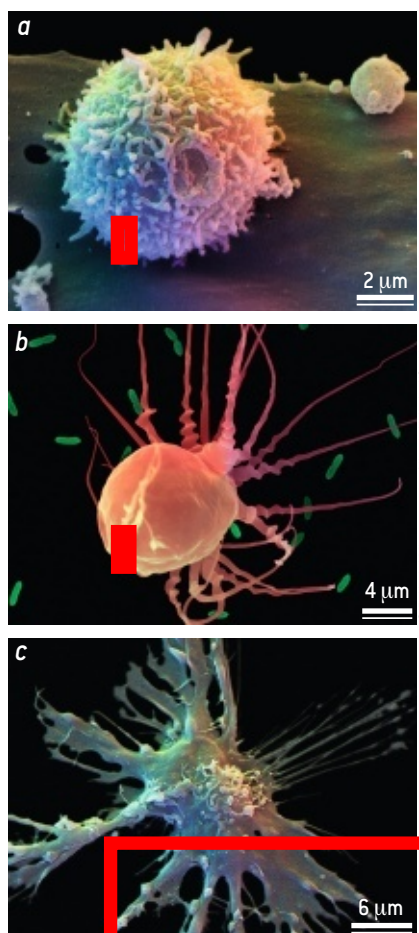
Les particules de VIH infectent des lymphocytes T CD4+, notamment des lymphocytes T mémoire [1]. Elles intègrent leur génome à celui de la cellule hôte et restent ainsi en dormance tant que la cellule est inactivée [2]. Les lymphocytes infectés deviennent ainsi des réservoirs du VIH.

Indépendamment, une réaction immunitaire active les lymphocytes T infectés : par exemple, des bactéries ont franchi la barrière intestinale, peu protégée, car le VIH a endommagé les cellules immunitaires qui l'entourent [3] ; ou encore, un autre virus a été détecté par un macrophage, qui a déclenché une réponse immunitaire spécifique en présentant des antigènes viraux à des lymphocytes T mémoire, qui les ont reconnus [4].

L'activation des lymphocytes T infectés déclenche la prolifération de ces cellules et la production de virus dormant, qui infecte alors de nouveaux lymphocytes T [5]. De par la dynamique des lymphocytes, tout l'organisme est rapidement concerné.

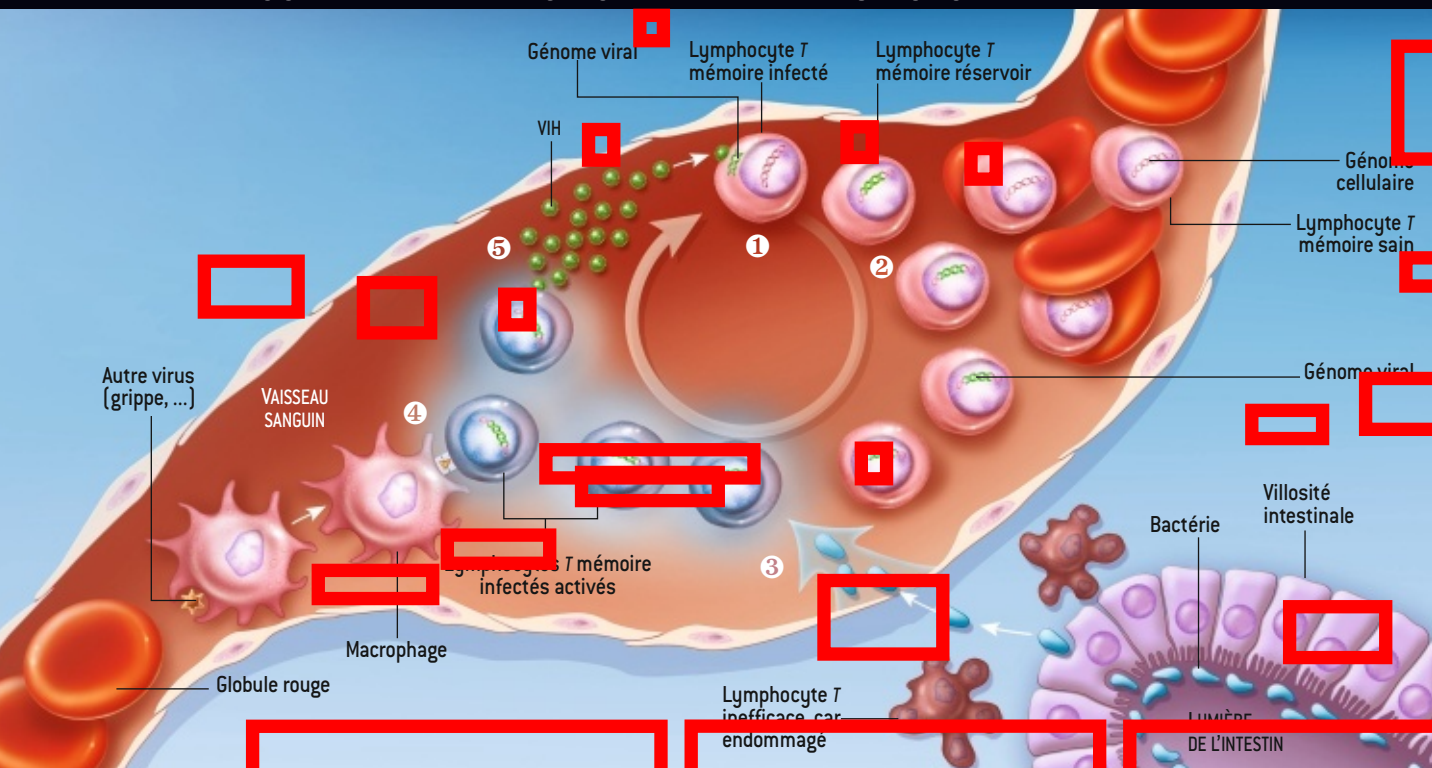
mosome. Lorsque le VIH infecte une cellule, son génome, constitué d'ARN, est traduit (rétrotranscrit) en ADN dans le milieu intracellulaire (le cytoplasme). Un complexe se forme, qui passe dans le noyau où il est intégré sous forme de provirus dans un chromosome cellulaire. Ainsi intégré au génome cellulaire, le virus entre en latence dans la cellule. Il y persiste longtemps, car le génome cellulaire est stabilisé par des mécanismes moléculaires qui compactent la chromatine – l'association d'ADN et de protéines qui constitue les chromosomes. L'ADN est enroulé autour de complexes protéiques (des nucléosomes), formant un « collier de perles » qui s'enroule encore sur lui-même. Cette compaction bloque l'expression des gènes et, de fait, la réplication virale.

Plus précisément, la transcription des gènes c'est-à-dire leur traduction en ARN, dépend du degré de compaction de la chromatine. Ce degré est régulé par contrôle épigénétique, c'est-à-dire par modification chimique (acétylation, méthylation, ubiquitinylation, phosphorylation...) de l'ADN, grâce à des enzymes. Ces modifications épigénétiques permettent le recrutement de protéines qui stabilisent la chromatine sous forme compacte – et maintiennent le génome viral à l'état quiescent. Des microARN, de petits ARN d'environ



**2. LES TROIS CIBLES DU VIH** observées en microscopie électronique à balayage [en fausses couleurs]. Les lymphocytes T (a) en sont la cible principale, mais les macrophages (b) et les cellules dendritiques (c), d'autres cellules immunitaires, peuvent aussi être contaminées et participer à la dissémination du virus.

## COMMENT L'INFECTION PAR LE VIH S'AUTO-ENTRETIENT



qui ne codent pas de protéine, sont aussi impliqués dans le maintien de la latence virale. C'est le passage de la forme condensée de la chromatine (hétérochromatine) qui rend les gènes accessibles.

### Décompacter la chromatine

L'objectif des traitements antilatence est de purger les cellules réservoirs en activant la transcription virale, et ainsi déclencher la réplication virale, laquelle conduira à la mort cellulaire. Quand une cellule produit des particules de VIH, elle est repérée par le système immunitaire (s'il est suffisamment actif) qui déclenche l'apoptose, c'est-à-dire la mort programmée de la cellule.

Plusieurs approches pourraient être utilisées. La première consiste à décompacter la chromatine. À ce titre, les HDACi, des inhibiteurs d'une protéine qui compacte la chromatine, l'histone dé-acétylase, ont été proposés. Parmi eux, l'acide valproïque, un médicament déjà utilisé dans certaines pathologies humaines, était intéressant, car non toxique; cependant, il s'est révélé peu efficace. Une molécule anticancéreuse, le vorinostat, a quant à elle montré de bons résultats *in vitro*, mais sa toxicité cellulaire est telle (comme celle d'autres médicaments

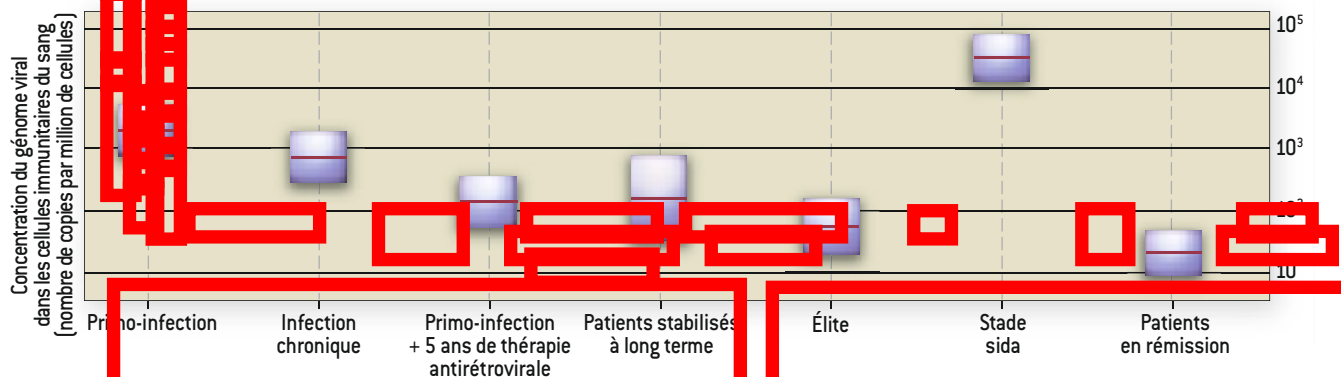
anticancéreux) que les réticences sont nombreuses. Deux essais à très faibles doses sont en cours en Australie et aux États-Unis, afin de vérifier que la stratégie est intéressante.

Une deuxième approche vise à activer les gènes viraux, notamment les gènes LTR (Long Terminal Repeat), qui amplifient la transcription virale. Plusieurs mécanismes d'activation sont possibles, notamment en utilisant des agents activateurs de la protéine NF- $\kappa$ B, un facteur cellulaire jouant un rôle majeur dans la transcription, ou de la protéine kinase C, qui intervient notamment dans les voies de signalisation de la transcription. Plusieurs nouvelles classes de médicaments anticancéreux qui ont ces mêmes molécules pour cibles font l'objet d'études dans l'infection à VIH. Cette approche nécessite toutefois que la chromatine soit décompactée.

Une troisième piste consiste à activer les lymphocytes par immunothérapie. Il a été proposé d'utiliser des cytokines de type IL7 et IL15. Ce sont des messagers libérés par les lymphocytes T lors d'une infection. Ces molécules déclenchent une réaction inflammatoire – la prolifération et l'activation de certains lymphocytes. En activant les lymphocytes, certains immunologistes pensent entraîner la réplication virale et aboutir à une purge des cellules

réservoirs, tout en faisant proliférer les lymphocytes pour régénérer le système immunitaire. Des études récentes *in vitro* ont montré que IL15 active beaucoup mieux la réplication virale que IL7. En revanche, IL7 déclenche plus facilement la prolifération lymphocytaire que IL15. Mais cette cytokine entraîne aussi la prolifération de lymphocytes infectés, puisque ceux-ci ont les mêmes propriétés que les cellules saines. L'effet produit risque donc d'être l'inverse de l'effet escompté. Les conditions d'utilisation de telles approches devront être mieux définies avant de faire prendre des risques aux patients. Certains chercheurs, enfin, proposent de réduire l'inflammation qui entraîne la réplication virale continue, laquelle participe à entretenir le nombre de cellules réservoirs.

Au total, il apparaît qu'il faut décompacter la chromatine pour rendre les gènes viraux accessibles, puis activer ceux-ci pour déclencher la transcription virale. Des combinaisons associant plusieurs types de molécules seront donc nécessaires. Il sera aussi indispensable d'empêcher que les virus produits avant la mort cellulaire n'infectent de nouvelles cellules; pour cela, les traitements antirétroviraux devront être maintenus. Enfin, certains virologues pensent qu'il sera aussi nécessaire de renforcer les



### 3. NIVEAU MOYEN DES RÉSERVOIRS DU VIH à différents stades

de l'infection (le trait rouge correspond à la médiane et les boîtes à la dispersion). Les données sont issues de la littérature et de ceux qui viennent juste d'être contaminés (primo-infection) et ceux qui sont au stade final de la maladie (stade sida). L'« élite », d'après celui des copies du génome du VIH dans les cellules immunitaires du sang. Les patients qui présentent le plus de cellules réservoirs.

réponses immunitaires, notamment celles des lymphocytes T CD8+ cytotoxiques, à même de tuer les cellules produisant le VIH.

Plusieurs de ces approches se sont révélées actives sur des modèles cellulaires *in vitro*. Toutefois, elles ne sont pas équivalentes et il apparaît que certaines approches seront sans doute moins puissantes que d'autres lorsqu'elles seront utilisées *in vivo*. De nombreuses études complémentaires sont encore nécessaires pour connaître les doses à utiliser, les formulations pharmaceutiques, les voies d'administration et les meilleures combinaisons – les plus puissantes et les moins toxiques. Il sera aussi indispensable de contrôler l'absence de toxicité et d'activation sur les cellules non infectées. Le mieux serait de ne cibler que les cellules infectées. Des recherches se poursuivent dans ce sens pour trouver des molécules activant spécifiquement des gènes viraux sans atteindre les gènes cellulaires.

L'éradication du VIH signifie éliminer les cellules infectées du système immunitaire présentes dans le sang, mais aussi disséminées dans tous les tissus de l'organisme. Quelle que soit la classe médicamenteuse utilisée, il s'agira donc de disposer de molécules qui diffusent bien, y compris dans les tissus profonds. À ce titre, le système nerveux central est un sanctuaire, car il est protégé par la barrière hémato-encéphalique, qui peut empêcher certains médicaments d'atteindre le cerveau. Des études sont menées chez l'animal pour tester le passage de drogues dans le cerveau et lever cet obstacle supplémentaire.

L'efficacité d'un traitement visant à éradiquer les cellules réservoirs dépendra aussi du moment où il est initié. Plus tôt, plusieurs années, nous nous attachons à com-

prendre comment sont constitués les réservoirs chez les patients infectés par le VIH et quels sont leurs niveaux moyens aux différents stades de l'infection. Nous avons observé que le nombre total de cellules infectées n'est pas très élevé (entre 1 000 et 10 000 cellules infectées par million de cellules), mais qu'il varie d'un patient à l'autre.

### Traiter le plus tôt possible

Dès la primo-infection, en moins de trois mois, le virus envahit l'organisme et les cellules infectées contaminent les différents territoires tissulaires et lymphoïdes. Certains sujets ont des niveaux d'infection nettement supérieurs à d'autres ; ils ont un risque plus élevé de progression rapide vers le sida. Suit une longue phase chronique durant laquelle les réservoirs augmentent lentement à mesure que l'efficacité du système immunitaire faiblit. C'est au stade sida que la proportion de cellules infectées est la plus élevée, alors que le nombre de lymphocytes T CD4+ est particulièrement bas (voir la figure 3).

Les traitements antirétroviraux ont peu d'impact sur les cellules réservoirs, dont la quantité diminue peu quand le traitement commence en phase chronique, car à ce stade les cellules infectées sont majoritairement au repos. C'est lorsque le traitement débute dès la primo-infection que le nombre de réservoirs peut être réduit. C'est donc chez de tels patients que l'on pourrait purger les réservoirs, d'autant que le système immunitaire serait encore capable de maintenir et de contrôler la réplication de quelques cellules infectées résiduelles.

Cependant, utiliser des molécules potentiellement toxiques soulève des questions éthiques complexes. Des traitements toxiques sont tout à fait justifiés contre le cancer lorsque l'espérance de vie est réduite ; ils sont beaucoup moins acceptables chez des sujets dont l'infection est stabilisée et qui ont une espérance de vie quasi normale. Par ailleurs, de tels traitements risqueraient de réactiver des rétrovirus endogènes susceptibles de entraîner des cancers (par dérégulation de gènes suppresseurs de la prolifération tumorale, par exemple).

À défaut d'éliminer les cellules réservoirs de l'organisme, il est possible d'imaginer en réduire le nombre au point qu'elles ne produisent presque plus de virus et qu'elles soient contrôlées par des réactions immunitaires spécifiques du VIH. Des exemples d'un tel contrôle viral sont observés chez des sujets dont la maladie ne progresse pas alors qu'ils sont infectés depuis plusieurs années. Ces rares sujets (moins d'un pour cent des sujets infectés) restent asymptomatiques à long terme en l'absence de tout traitement ; ils présentent très peu de réservoirs. Désignés sous le terme d'« élite » (en anglais *elite controllers*), ces cas sont étudiés actuellement par de nombreux équipes qui cherchent à identifier et à comprendre les mécanismes immunitaires impliqués dans ce contrôle naturel de l'infection à VIH.

En 2010, notre groupe a rapporté pour la première fois l'observation de cinq sujets (dix pour cent des sujets étudiés) qui, après avoir été traités précocement en primo-infection par trithérapie classique pendant quelques années, ont conservé un niveau très bas de réplication virale, et ce après plusieurs années sans traitement.

L'importance de la description de tels cas vient du fait qu'ils n'ont pas de caractères génétiques protecteurs, tels ceux observés chez l'élite. Ces sujets sont en rémission. Représentent-ils une exception? Ce modèle pourrait-il être reproduit à plus grande échelle?

Nos travaux visent notamment à déterminer chez ces patients les mécanismes responsables du contrôle. Notre hypothèse est que le système immunitaire peut être protégé par un traitement très précoce, limitant l'invasion du tube digestif et son altération afin de réduire son inflammation, très active en primo-infection. Nous avons aussi organisé, avec l'aide de l'Agence nationale de recherches sur le sida et les hépatites virales (ANRS), un essai thérapeutique qui propose un traitement antirétroviral dès la primo-infection, de façon à montrer que de tels traitements peuvent réduire considérablement les réservoirs et en limiter l'extension. Les résultats seront disponibles fin 2013.

Les obstacles à l'éradication du VIH sont encore nombreux, mais de nouveaux

outils tels que le transcriptome (l'ensemble des ARN issus de la transcription du génome d'un échantillon) et le protéome (l'ensemble des protéines exprimées dans un échantillon) vont permettre de mieux comprendre les mécanismes épigénétiques impliqués dans la régulation de la transcription virale et, peut-être ainsi, de mieux cibler les cellules infectées. Simultanément, l'étude des mécanismes de latence du VIH suggère que de nouvelles classes thérapeutiques, notamment parmi les antitumoraux, méritent d'être explorées, car elles pourraient être des médicaments potentiels.

Les besoins thérapeutiques sont immenses du fait que les traitements actuels doivent être pris à vie. Des traitements d'éradication brefs et définitifs non seulement réduiraient les coûts, mais laisseraient imaginer l'éradication de la pandémie. Les enjeux économiques sont majeurs; plus que jamais, ils nécessitent l'implication de l'industrie pharmaceutique, de toute la communauté scientifique et des personnes contaminées par le VIH.

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

Sh. R. Lewin et Ch. Rouzioux, *HIV cure and the laboratory to effective clinical trials?*, *AIDS*, vol. 25, pp. 885-897, 2011.

L. Hocqueloux et al., *Long-term immunovirologic control following antiretroviral therapy in patients treated at the time of primary HIV-1 infection*, *AIDS*, vol. 24, pp. 1599-1604, 2010.

Le sida, 25 ans après. Les grands défis, *Pour la Science*, n° 377, pp. 38-57, 2008.

Ch. Rouzioux et al., *Early levels of HIV-1 DNA in peripheral blood mononuclear cells are predictive of disease progression independently of HIV-1 RNA levels and CD4+ T cell counts*, *J. Infect. Dis.*, vol. 191, pp. 46-55, 2005.

J. Ghosn et al., *Evidence of genotypic resistance diversity of archived and circulating viral strains in blood and semen of pre-treated HIV-infected men*, *AIDS*, vol. 18, pp. 447-457, 2004.

**france culture**

# VOYAGER DANS LE TEMPS

**La marche des sciences**  
Aurélie Luneau  
**14h/15h - jeudi**  
En partenariat avec *Pour la Science*

franceculture.fr

# Les matériaux autocicatrisants

S. White, B. Dlaiszik, S. Kramer, S. Stangeboela, J. Moore et N. Sottos

Depuis une dizaine d'années, scientifiques et ingénieurs mettent au point des matériaux capables de se réparer spontanément en cas de désât.

Plusieurs voies existent pour y parvenir : microcapsules, réseaux de capillaires ou chimie adaptée.

**R**ien n'est éternel. Tous les matériaux fabriqués par l'homme finissent par s'abîmer. Les pièces endommagées doivent être alors remplacées, ce qui est coûteux. Les organismes vivants, eux, ont développé la capacité de se réparer par des mécanismes de cicatrisation et de régénération. Or depuis quelques années, les spécialistes des matériaux élaborent des techniques permettant d'obtenir, comme chez les êtres vivants, des capacités d'autoréparation pour les polymères, les composites et autres matériaux de synthèse.

De tels matériaux autocicatrisants peuvent, à la suite d'une fissure ou d'une déchirure, s'autoréparer et retrouver leurs fonctionnalités en utilisant des réactifs qui leur sont directement accessibles. Ils constituent un nouveau moyen d'obtenir des produits et des composants plus sûrs et plus durables, et marquent un tournant par rapport aux schémas classiques de la conception et du génie des matériaux.

Lorsqu'un matériau est endommagé, la réaction de l'organisme est l'inflammation et la

## L'ESSENTIEL

✓ On peut obtenir des matériaux capables de s'autoréparer au moyen de réactifs contenus dans des capsules ou des capillaires, ou en mettant à profit des liaisons intermoléculaires appropriées.

✓ Le défi est d'assurer une autocicatrisation efficace et renouvelable, tout en étant compatible avec les autres propriétés exigées du matériau.

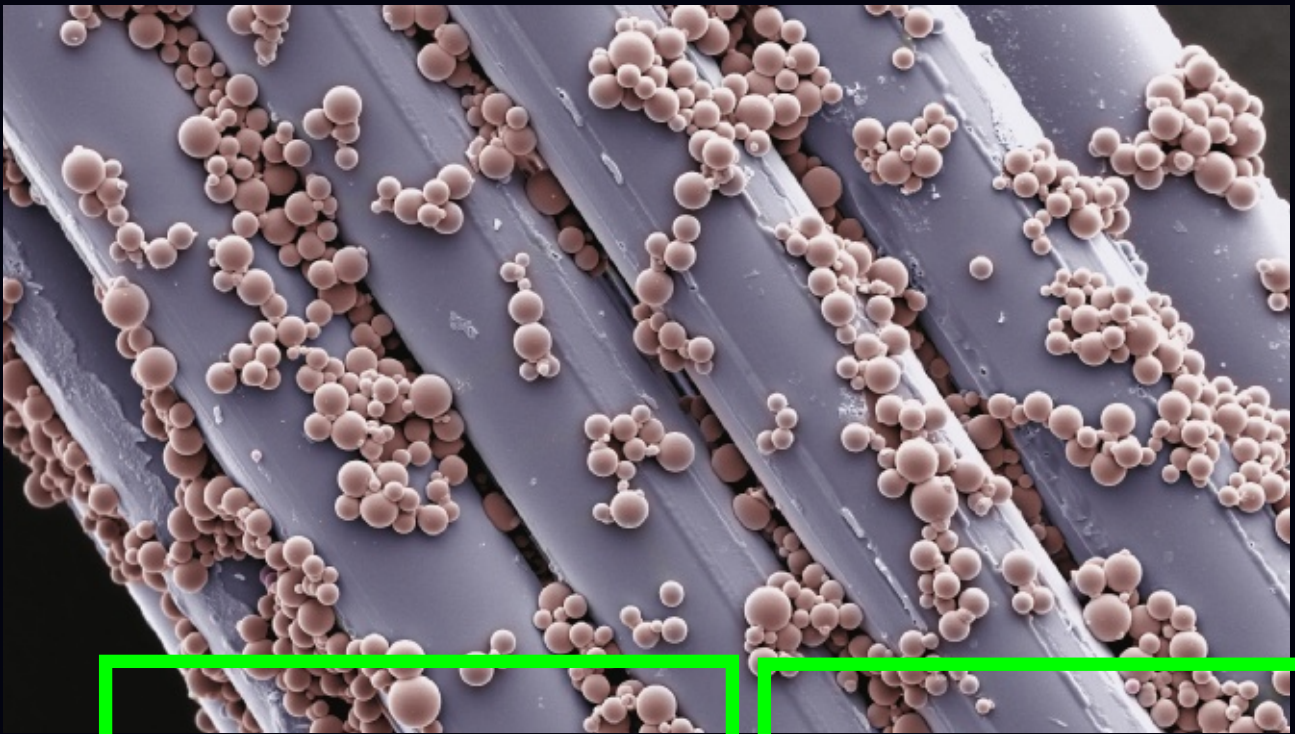
✓ Les matériaux autocicatrisants donneront lieu à des produits plus sûrs, plus durables et moins coûteux à entretenir.

Image tirée de B. Dlaiszik et al., *Advanced Functional Materials* 20, 3547, avec la permission de John Wiley and Sons.

coagulation du sang. Cette étape initiale est suivie par une prolifération de cellules au site de la lésion ; il s'agit d'une matrice préparant la réparation. Dans l'étape finale de la cicatrisation, le remodelage de la matrice, un tissu neuf se crée et comble la blessure. Ce dernier processus peut durer jusqu'à quelques mois, voire quelques années, selon la gravité de la blessure.

Une suite analogue d'événements, mais plus simple et plus rapide, est à l'œuvre dans les matériaux autocicatrisants. Une lésion déclenche l'acheminement rapide de réactifs au site endommagé, et la cicatrisation s'effectue par une réaction du matériau, auquel se lie aux réactifs ayant comblé la zone endommagée. Le plus souvent, l'agent cicatrisant est constitué de deux liquides qui se solidifient lorsqu'ils se mélangent. La durée de cette réparation chimique dépend du mécanisme en jeu, mais elle est de l'ordre de quelques heures à quelques jours.

La plupart des avancées dans le domaine des matériaux autocicatrisants



**1. CES FIBRES DESTINÉES À RENFORCER UN MATÉRIAU COMPOSITE** sont revêtues de capsules permettant au matériau de s'autoréparer. Les fibres de verre, de 15 micromètres de diamètre environ, sont plus fines qu'un cheveu humain. Les capsules sont remplies d'un agent cicatrisant

liquide qui s'écoule quand une fissure les rompt. Un tel agent peut aussi être acheminé par un réseau de capillaires. Une autre possibilité est de développer des matériaux qui s'autocicatrisent grâce à leurs propriétés chimiques intrinsèques.

ont été accomplies ces dix dernières années. Elles sont plus mûres pour les polymères et les matériaux composites renforcés par des fibres que pour d'autres types de matériaux. Par ailleurs, on peut distinguer trois catégories de mécanismes d'autocicatrisation. Ces mécanismes peuvent être à base de microcapsules, de réseaux vasculaires ou de type intrinsèque. Les trois types de mécanismes se distinguent par la méthode utilisée pour emmagasiner la fonctionnalité de cicatrisation du matériau jusqu'à ce qu'un dégât survienne et la déclenche. Ils diffèrent aussi par l'ampleur des dégâts pouvant être réparés, ainsi que par la possibilité de répéter la réparation au même endroit et par la vitesse de cicatrisation.

Dans les matériaux à base de microcapsules, un agent cicatrisant est protégé au sein de minuscules coquilles sphériques, qui se rompent en cas de dégât. L'autocicatrisation est activée par la libération de l'agent cicatrisant et sa réaction sur le site des détériorations.

est ensuite épuisé : le procédé ne peut servir qu'une seule fois en un site donné.

Dans les matériaux vasculaires, l'agent cicatrisant est transporté par un réseau de capillaires. Il peut s'agir de tubes isolés, de plans de tubes interconnectés ou de réseaux tridimensionnels de tubes. En cas de dégât, le réseau vasculaire se rompt à l'endroit en question et libère l'agent cicatrisant. Grâce à la connectivité du réseau, plusieurs réparations sont possibles en un même site.

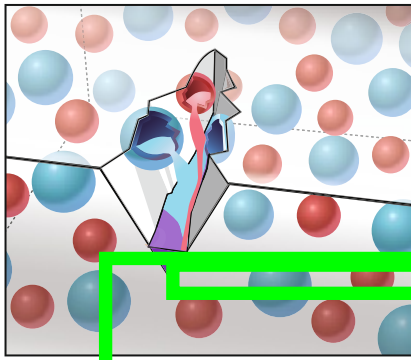
## Des matières réactives en réserve

Quant aux matériaux à autocicatrisation intrinsèque, ils ont une capacité d'autocicatrisation généralement inscrite dans le réseau chimique du matériau polymère, et non pas dans un agent cicatrisant stocké séparément. Les réparations s'effectuent grâce à des mécanismes moléculaires, tels que la création de liaisons hydrogène, des interactions ioniques et

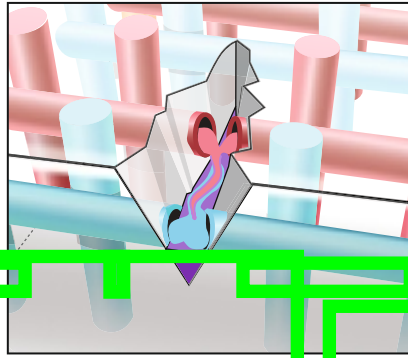
la mobilité et l'enchevêtrement des chaînes du polymère. Chacun de ces mécanismes est réversible, ce qui autorise des réparations multiples.

Pour les matériaux à base de microcapsules, on dispose d'un certain nombre de techniques pour créer des parois de coquilles en polymère qui vont protéger les matériaux réactifs contenus à l'intérieur. Les méthodes les plus courantes font appel à la formation d'une coque à l'interface de gouttes dans une émulsion d'huile dans l'eau. Dans ce cas, la coquille obtenue sera mince et fragile, comme celle d'un œuf, et elle se cassera si elle subit une contrainte. Une autre procédure consiste à émulsionner un polymère fondu de manière à ce qu'il forme des gouttelettes, qui sont alors solidifiées par un changement de température ou par l'extraction d'un solvant, ce qui crée une épaisse sphère protectrice autour du noyau.

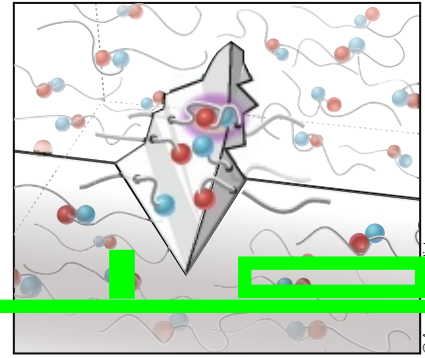
Une fois que l'agent cicatrisant est protégé à l'intérieur, la dernière étape importante consiste à incorporer ces dernières



**a** Système à base de microcapsules



**b** Système vasculaire



**c** Système intrinsèque

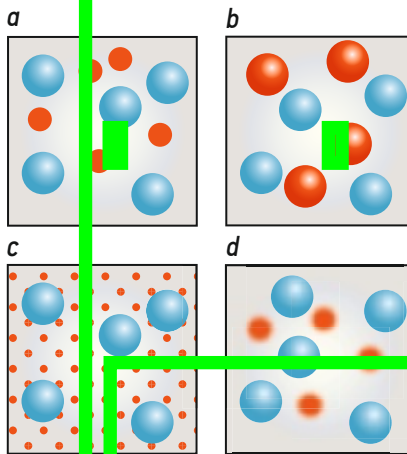
**2. LES SYSTÈMES AUTOCICATRISANTS** se divisent en trois grandes catégories. Les systèmes à base de microcapsules (**a**) stockent l'agent cicatrisant (en bleu) et l'agent de polymérisation ou catalyseur (en rouge) dans des bulles réparties dans le matériau. Dans les systèmes vas-

culaires (**b**), deux réseaux de capillaires rechargeables acheminent l'agent cicatrisant et le polymérisateur. Les systèmes intrinsèques (**c**) utilisent la nature réversible de certaines liaisons moléculaires pour intégrer la faculté d'autocicatrisation directement au matériau.

dans un polymère. En pratique, il a été montré que les capsules peuvent survivre aux forces de cisaillement, aux changements de température et aux autres conditions régnant lors de l'élaboration du matériau. Le matériau composite ainsi obtenu doit être caractérisé, car les microcapsules modifient en général les propriétés mécaniques du matériau, telles que sa résistance à la fracture et son élasticité.

Chaque événement de réparation nécessite au moins deux réactifs : l'agent cicatrisant et un agent polymérisant, ou catalyseur, grâce auquel le premier se solidifie. Dans tous les cas, l'agent cicatrisant est placé dans des capsules, mais il existe différentes méthodes pour incorporer le catalyseur. Par exemple, il peut être tout simplement répandu à l'état libre dans l'ensemble du matériau principal. Plusieurs types de matériaux, dont les époxydes et les composites renforcés par des fibres, ont été testés avec ce principe. Notre équipe a trouvé que les matériaux résultants ont de bonnes efficacités de cicatrisation et des durées de vie prolongées quand ils sont soumis à des charges de fatigue.

Une autre approche est de stocker l'agent cicatrisant et l'agent polymérisant dans des capsules séparées. Cette méthode est particulièrement efficace quand plus de deux réactifs sont requis pour effectuer une réparation. Certains de nos travaux sur cette méthode multicapsules visaient ainsi à empêcher la corrosion : un agent cicatrisant (une résine) et un catalyseur à base d'étain, encapsulés séparément, ont été incorporés dans un revêtement en époxyde. D'autres équipes ont également développé des matériaux avec différents agents.



**3. LES MÉTHODES DE CICATRISATION** à base de capsules utilisent différents moyens pour stocker le catalyseur (en rouge), qui réagit avec l'agent cicatrisant (en bleu) et solidifie ce dernier. Dans certains systèmes, le catalyseur est librement dispersé dans le matériau (**a**). Les systèmes multicapsules ont des types distincts de capsules pour le catalyseur et pour l'agent cicatrisant (**b**). Il est également possible d'intégrer intimement le catalyseur au matériau principal lui-même (**c**). Enfin, le catalyseur peut être dispersé dans le matériau sous forme de gouttelettes insolubles (**d**).

Il est également possible d'incorporer le catalyseur sous forme latente à la matrice du matériau elle-même. Un exemple que nous avons étudié est l'ajout d'amines (des composés organiques) dans une matrice d'époxyde, qui déclenchent la polymérisation lorsque l'agent cicatrisant est libéré. Pour produire une réaction, d'autres recherches font intervenir des stimuli de l'environnement, tel qu'une oxydation ou une évaporation.

## Un réseau de tubes

Les agents cicatrisants encapsulés ont un grand potentiel, mais ils sont assortis d'une limite implacable : ils ont un volume fini et ne permettent qu'une seule opération réparatrice en un endroit donné. Cette restriction a conduit les chercheurs à développer des matériaux autocicatrisants vasculaires, inspirés des réseaux de vaisseaux des organismes vivants.

Dans l'approche synthétique, un réseau de capillaires contient l'agent cicatrisant, tandis qu'un second réseau, entrelacé mais non connecté au premier, contient le catalyseur. On retrouve dans une large mesure les mêmes difficultés de conception que dans les systèmes à base de capsules : les chercheurs doivent déterminer l'effet des réseaux incorporés sur les propriétés mécaniques du matériau, sur l'efficacité du déclenchement de la cicatrisation et sur la qualité de celle-ci. Mais c'est au niveau des difficultés de fabrication et d'intégration dans le matériau principal que les deux systèmes divergent.

Contrairement aux systèmes à base de capsules, les réseaux vasculaires ne peuvent

l'agent cicatrisant après la mise en place du réseau et cela se fait en général par l'application d'un vide. Par conséquent, le choix des agents cicatrisants doit prendre en compte des propriétés telles que la mouillabilité des surfaces, la viscosité des liquides et la réactivité chimique. Ainsi, lorsqu'un agent est trop visqueux ou n'est pas assez mouillant, le remplissage du réseau de capillaires, le transport de l'agent et sa libération au niveau des sites endommagés sont compromis.

La technique la plus simple pour assembler un réseau vasculaire est sans doute d'utiliser des fibres de verre creuses. Ces fibres sont aujourd'hui faciles à fabriquer, elles sont compatibles avec les polymères usuels, et le verre ne réagit pas avec de nombreux agents cicatrisants appréciés, telles les résines époxy à deux composants. De plus, on peut entrelacer ces fibres creuses avec les renforts en fibre de verre et de carbone utilisés dans les composites, leur taille et forme étant similaires. Les premiers systèmes expérimentaux portaient en œuvre des fibres d'environ un millimètre de diamètre, mais des fibres de 15 micromètres de diamètre sont maintenant disponibles.

Cependant, l'un des gros inconvénients des fibres de verre creuses est qu'elles n'autorisent que des connexions unidimensionnelles. Une plus grande connectivité, dans des réseaux de canaux à deux ou trois dimensions, confère de nombreux avantages. Dans un tel réseau, chaque point a des connexions multiples, si bien que le système est plus fiable en cas d'obstruction, et qu'il dispose

d'un accès à un plus grand réservoir d'agents cicatrisants. Ainsi, non seulement le système est capable de réparer des zones endommagées plus importantes, mais il peut aussi être rechargé plus facilement pour une utilisation répétée.

## Un tissu de fibres que l'on fait disparaître

Dans la technique de l'« écriture directe », la plus répandue pour construire des réseaux vasculaires à deux ou trois dimensions, on monte d'abord un échafaudage à l'intérieur d'un moule, qu'on remplit ensuite avec un liquide précurseur de polymère. Une fois le polymère solidifié, l'échafaudage est dissous chimiquement, ce qui laisse dans le polymère un réseau de tubes creux. Cette approche offre un bon contrôle de la forme du réseau, mais le choix de matériaux pour la matrice est limité, car ils doivent être physiquement et chimiquement compatibles avec l'échafaudage.

Notre équipe a développé une méthode plus souple, qui consiste à sacrifier des fibres : on les entrelace dans un matériau composite, puis on les évapore à des températures de 200 à 240 °C. Ces fibres perdent leur structure jusqu'à 180 °C et peuvent donc être mélangées à des fibres classiques. Au préalable, par un procédé de tissage, on crée une préforme tissée en trois dimensions, dans laquelle on fait pénétrer par infiltration

la matrice de polymère, et que l'on chauffe. Les croisements de fibres « sacrificielles » correspondent alors, dans le

## LES AUTEURS

Scott WHITE est professeur de génie aéronautique à l'Université de l'Illinois, aux États-Unis. Jeffrey MOORE est professeur de chimie et Nancy SOTTOS professeur de science des matériaux. Benjamin BLAISZIK, Charlotte KRAMER et Solar OLUGBEFOLA sont chercheurs postdoctorants.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

## BIBLIOGRAPHIE

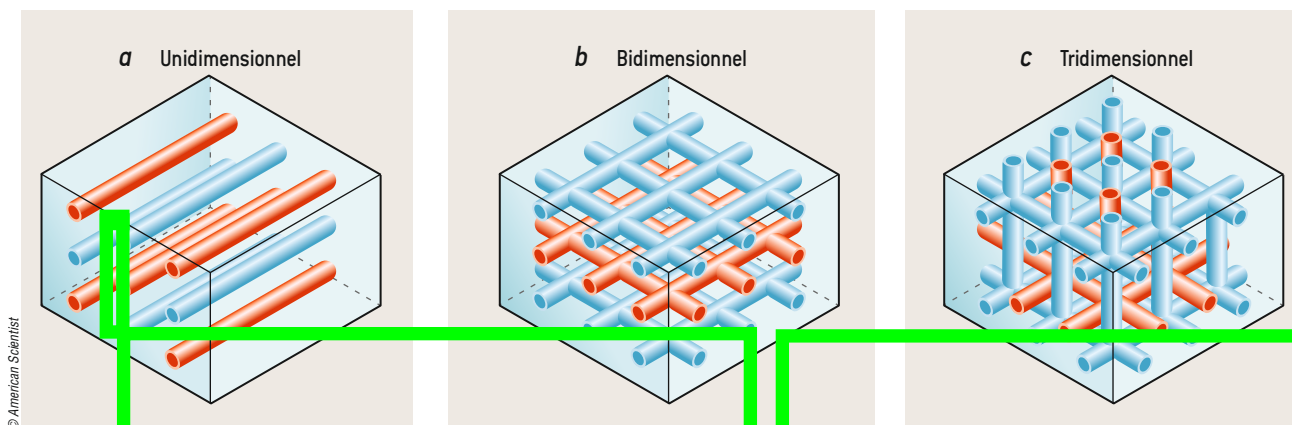
B. J. Blaiszik et al., Autonomic regeneration of electrical conductivity, *Advanced Materials*, vol. 24(3), pp. 398-401, 2012.

B. J. Blaiszik et al., Self-healing polymers and composites, *Annual Review of Material Research*, vol. 40, pp. 179-211, 2010.

C. J. Hansen et al., Self-healing materials with intrinsically microvascular networks, *Advanced Materials*, vol. 21(41), pp. 4143-4147, 2009.

P. Cordor et al., Self-healing and thermoreversible rubber from supramolecular assembly, *Nature*, vol. 451, pp. 927-930, 2009.

R. P. Wool, Self-healing materials: A review, *Soft Matter*, vol. 4(3), pp. 400-418, 2008.



**4. LES RÉSEAUX VASCULAIRES AUTOCICATRISANTS** contiennent les agents cicatrisants (en bleu) et les catalyseurs (en rouge) dans des capillaires séparés. Les réseaux unidimensionnels (a) peuvent être constitués de fibres de verre creuses, des réseaux bidimensionnels (b) et

tridimensionnels (c) peuvent être fabriqués en modifiant le matériau d'un échafaudage que l'on dissout ensuite chimiquement, ou en mêlant des fibres dites sacrificielles à des fibres classiques pour matériaux composites, les fibres sacrificielles étant ensuite évaporées par chauffage.

## UN CAOUTCHOUC AUTORÉPARANT

On parle de matériau autoréparant autonome lorsque la réparation est déclenchée non par une action extérieure (chaleur, lumière...), mais par le dommage lui-même. Les systèmes vasculaires et les dispositifs à capsules ont bien ce type de comportement, mais ils requièrent une mise en œuvre complexe et présentent une fragilité intrinsèque. Les matériaux à inclusions liquides. De plus, le nombre de réparations est limité par l'épuisement des réactifs.

À l'inverse, un polymère à l'état fondu est présent en permanence et sans limite d'autoréparation. Cependant, à l'état fondu, les chaînes polymères (voir la figure 6). Le problème, c'est que

temps, un tel matériau ressemble à un solide élastique, il présente des surfaces collantes et, à terme, finit par s'écouler sous l'effet d'une contrainte.

Réaliser un matériau polymère homogène capable de se comporter comme un vrai solide élastique et de s'autoréparer sans action extérieure est donc un défi. En 2008, Philippe Corne et Corinne Soulié-Ziakovic ont conçu des molécules arborées capables de s'accrocher les unes aux autres par une multitude de points d'ancrage, nommés « stickers », où plusieurs liaisons hydrogène parallèles sont

présentes. Lors d'un dommage, les liaisons chimiques, les liaisons hydrogène se rompent et se réassocient

lement le matériau que nous avons mis au point n'est pas collant, il présente en surface, en cas de dommage, un grand nombre de stickers célibataires prêts à se réassocier. Cet état hors d'équilibre, qui confère la réparabilité, se maintient plusieurs jours. Et, lorsqu'il est perturbé, presque immédiatement dès que les fragments sont remis en contact (voir les photographies ci-contre).

Pour comprendre ce paradoxe, il faut remarquer que les stickers célibataires, les plus nombreux après endommagement, sont malgré tout minoritaires. C'est donc le plus sou-

beaucoup plus de nouveaux liens que la seule recombinaison de deux stickers célibataires. Par ailleurs, les stickers étant par nature très différents des chaînes flexibles qui les portent, une ségrégation se produit au sein du matériau, où stickers et chaînes flexibles tendent à se regrouper en couches alternées. Deux stickers éloignés l'un de l'autre doivent alors pour se recombiner, franchir une barrière. C'est grâce à cette structure particulière, à l'échelle moléculaire, que la réparation est encore possible sur une échelle de temps aussi longue.

**François Tournilhac**  
et **Ludwik Leibler**,

Laboratoire Matière molle  
et chimie, ESPCI-Paris

matériau fini, à des connexions entre les canaux.

Contrairement à l'écriture directe, difficile à transposer à une échelle de production commerciale, la méthode des fibres sacrificielles utilise des techniques de fabrication classiques. Nous avons ainsi créé des tubes allant jusqu'à un mètre de long, et avons pu obtenir une bonne complexité vasculaire. Afin de concevoir efficacement des réseaux tridimensionnels, notre équipe a utilisé une stratégie de modélisation fondée sur des algorithmes génétiques pour optimiser des propriétés telles que la fiabilité, le volume du réseau et le diamètre des canaux.

D'autres travaux ont fait appel à l'écriture directe pour imiter la structure et les fonctionnalités de l'épiderme : un revêtement époxy cassant contenant un catalyseur a été déposé sur un substrat époxy souple avec un réseau tridimensionnel de tubes d'environ 0,2 millimètre de diamètre. Les fissures du revêtement, en surface, libéraient un agent cicatrisant issu du réseau vasculaire sous-jacent. Le réseau pouvait être rechargé et nous avons constaté que les échantillons pouvaient se cicatriser jusqu'à sept fois.

Pour augmenter le nombre de cycles de cicatrisation, mes collègues ont ensuite placé l'agent cicatrisant et le catalyseur dans deux réseaux distincts, ce qui a permis de faire passer le nombre de cicatrisations à 16. En affinant les méthodes d'écriture directe

pour créer des réseaux complexes isolés mais entrecroisés, nous avons obtenu plus de 30 cycles de cicatrisation successifs dans un revêtement. Des progrès plus récents permettent aussi une cicatrisation répétée dans la masse du matériau composite.

### Cicatriser sans apport d'agents extérieurs

L'un des principaux inconvénients des systèmes vasculaires ou à base de capsules est la nécessité d'intégrer des éléments supplémentaires dans le matériau de base. Une approche plus élégante consiste à doter directement le matériau lui-même d'une capacité de cicatrisation et à obtenir ainsi, grâce à la réversibilité des liaisons chimiques du polymère, une cicatrisation intrinsèque.

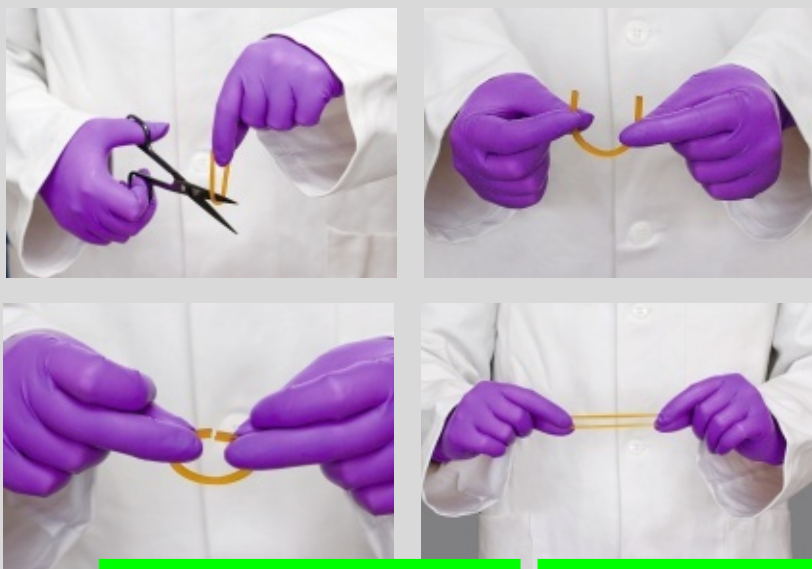
Ces types de matériaux ne nécessitent pas l'intégration d'un agent cicatrisant et évitent ainsi les problèmes de compatibilité entre différentes substances. En revanche, le principal défi est d'obtenir les propriétés mécaniques, chimiques et optiques désirées. De plus, l'autocicatrisation intrinsèque tend à être moins efficace quand la zone abîmée est étendue, la restauration des liaisons chimiques nécessitant une grande proximité entre les surfaces fissurées.

Un polymère est formé d'un grand nombre de composants simples, les monomères, liés chimiquement. La capacité inhérente

du matériau à se transformer de monomères en polymères réticulés, par l'apport d'énergie extérieure, est l'une des façons d'obtenir de l'autocicatrisation intrinsèque. Par exemple, si une zone abîmée du polymère est chauffée ou intensément illuminée, la mobilité des molécules peut augmenter dans la région endommagée, ce qui facilite la reconstruction des liaisons et la cicatrisation du matériau.

Une autre approche consiste à incorporer un additif thermoplastique fusible. Quand ce réactif se liquéfie sous l'effet de la chaleur, il se répand dans les fissures et s'émulsionne avec la matrice du matériau environnant. Certains additifs se dilatent également lorsqu'ils sont chauffés, ce qui aide à combler les zones abîmées. De telles réactions peuvent se produire de façon répétée.

Dans certains cas, on peut doter certains segments de polymère d'une charge électrique : ces morceaux sont nommés ionomères. Des amas de tels ionomères, activés par exemple par de la chaleur ou du rayonnement ultraviolet, peuvent jouer le rôle de réseaux de liaisons réversibles, joignant les deux bords d'une fissure. Plusieurs équipes ont étudié le comportement de ces matériaux ionomériques lorsqu'ils sont transpercés par des projectiles, et ont montré que la chaleur engendrée par la pénétration du projectile dans le matériau suffit pour déclencher la cicatrisation. La vitesse à laquelle le nouveau matériau



grimpait à 80 pour cent quand les échantillons étaient traités à 80 °C. La récupération complète de la solidité de ces matériaux semble limitée dans les cas où peu de fibres traversent la zone endommagée et où les agents cicatrisants sont inégalement répartis dans le plan de la fracture.

Un autre test sur les fractures qui s'autoréparent consiste à couper physiquement la surface d'un échantillon du matériau, puis à évaluer optiquement à la fois les dégâts d'abrasion et la fermeture de la fissure. Dans plusieurs études, les chercheurs ont coupé des polymères à autocicatrisation intrinsèque avec une lame de rasoir et les ont réparés en accolant les deux morceaux durant une dizaine de minutes à température ambiante. Les échantillons réparés étaient tordus ou déformés pour s'assurer de la non-réouverture des fissures. Les échantillons étaient parfois déchirés plutôt que coupés, avec des résultats similaires.

La fatigue des matériaux, mode d'endommagement courant, a été peu étudiée sur les systèmes autocicatrisants. Notre équipe et d'autres ont examiné la relation entre la vitesse d'endommagement, la vitesse de cicatrisation et l'allongement de la durée de vie de ces systèmes. Quand la vitesse d'endommagement est supérieure à la vitesse de cicatrisation, les détériorations s'accumulent et le matériau finit par se rompre. Pour éviter cela, des réactions chimiques plus rapides ou des périodes de repos plus longues peuvent être nécessaires pour le matériau. Toutefois, quand la

pratiquement équivalente à celle de l'endommagement par le projectile.

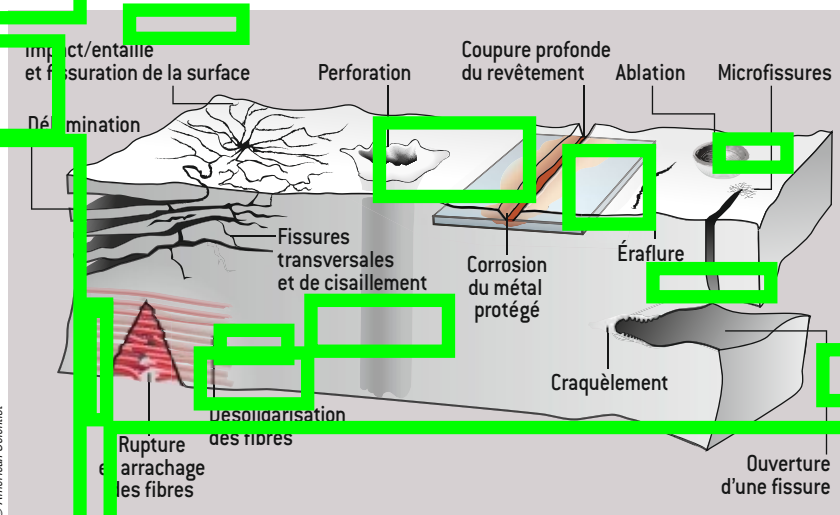
Idéalement, un matériau autocicatrisant devrait se réparer aussi vite que se produisent les dégâts. La plupart des matériaux autocicatrisants n'en sont pas encore là. L'efficacité de la réparation peut être calculée en termes de rapport des propriétés du matériau cicatrisé sur les propriétés du matériau initial. On cherche à obtenir une efficacité de cicatrisation de 100 pour cent, et chaque approche peut se prévaloir d'au moins un exemple où cet objectif est atteint. Les efficacités rapportées pour différents matériaux vont de 21 pour cent à plus de 100 pour cent (dans où les zones réparées sont plus solides que le matériau initial).

l'énergie des fissures en formation, ce qui limite leur développement.

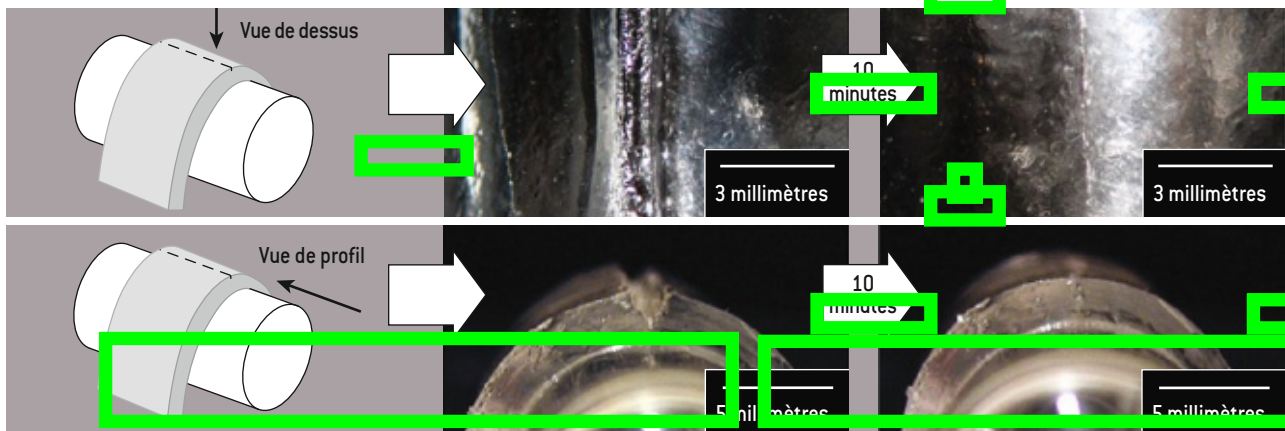
Avec les composites renforcés par des fibres, nous avons constaté qu'en incorporant des microcapsules plus grosses que les fibres de renfort, on épaissit les régions où les couches du matériau sont laminées ensemble, ce qui diminue dans un premier temps la résistance à la fracture. Mais après 48 heures de cicatrisation à température ambiante, des échantillons préalablement fracturés présentaient une efficacité de réparation d'environ 40 pour cent, et cette valeur

## Retrouver la qualité initiale du matériau

Pour tester la récupération des fractures dans des conditions contrôlées, des échantillons de matériaux sont soumis à toutes sortes d'impacts, de torsions, de tractions et de déchirures. En 2001, notre équipe a fait la démonstration de la première autocicatrisation réussie dans un époxyde avec un système à base de capsules, qui avait recouvré à 75 pour cent les propriétés d'origine du matériau. Nous avons également trouvé que des microcapsules pouvaient augmenter la résistance d'un époxyde non endommagé, parce que les billes absorbent



3. DIFFÉRENTS TYPES DE DOMMAGES peuvent nécessiter des systèmes distincts, ou même une combinaison de systèmes, pour obtenir une cicatrisation optimale. Les entailles, les impacts, l'exposition à des environnements corrosifs, les perforations balistiques, les rayures et les frottements mécaniques peuvent conduire à ces divers modes d'endommagement.



**6. ON TESTE UN POLYMÈRE À AUTOCICATRISATION INTRINSÈQUE** en coupant sa surface et en l'étirant au-dessus d'un cylindre (à gauche), afin de visualiser les dommages (au milieu). Dix minutes plus tard, on constate que grâce à la diffusion moléculaire et au réenchevêtrement des chaînes polymériques restées ballantes au niveau de la coupure, la surface s'est autoréparée (à droite).

vitesse d'endommagement et la vitesse de cicatrisation sont équilibrées, la durée de vie du matériau s'allonge notablement.

Les impacts d'objets ou de fragments matériels constituent une autre forme d'endommagement. Jusqu'à présent, les essais ont mis l'accent sur la mesure de la restauration de la résistance à la compression après un impact à faible vitesse. Nos collègues de l'Université de Bristol ont ainsi testé de l'époxyde renforcé par des fibres de carbone avec un réseau de fibres de verre creuses remplies d'un agent cicatrisant. Ce matériau a été soumis à des impacts de différentes énergies, allant jusqu'à trois joules. Les chercheurs ont montré que le système à fibres creuses absorbe une partie notable de l'énergie en se fracturant lors de l'impact, ce qui augmente de 13 pour cent la résistance à la compression. L'application de températures élevées permettait une réparation significative des dégâts, mais l'étude a aussi montré que cela dépend beaucoup de l'uniformité du réseau vasculaire.

Les études d'endommagement par impact sur la cicatrisation à base de capsules ont donné des résultats mitigés. Une équipe de l'Université de Zhongshan, en Chine, a testé des matériaux composites renforcés par des fibres de verre tissées avec des énergies d'impact allant de 1,5 à 3,5 joules ; ils ont trouvé des efficacités de cicatrisation proches de 100 pour cent pour les impacts à 1,5 joule, mais de 20 pour cent seulement pour les impacts à 3,5 joules. Cependant, quand notre équipe a testé un matériau similaire à des énergies d'impact de 13 à 45 joules, la cicatrisation importante de l'échantillon, les

efficacités de cicatrisation avoisinaient les 100 pour cent pour les impacts allant jusqu'à 20 joules ; au-delà, elles diminuaient.

Notre équipe a également testé la capacité d'autocicatrisation de membranes jouant le rôle de barrière vis-à-vis d'un fluide. Nous avons par exemple examiné des membranes dans lesquelles un système de cicatrisation à microcapsules était pris en sandwich entre deux couches de nylon recouvertes d'époxyde. Nous perforions les membranes avec des seringues et observions le résultat 24 heures après. L'efficacité avec laquelle les trous se refermaient allait de 40 à 100 pour cent, selon la taille et la concentration des microcapsules.

## Longévité et sûreté accrues, coûts réduits

Les revêtements anticorrosion, destinés à protéger des pièces métalliques devant fonctionner dans des environnements humides ou salés, sont une autre application potentielle des systèmes autocicatrisants. Plusieurs équipes ont testé avec succès des revêtements à base de capsules contenant de l'huile. Les systèmes à cicatrisation intrinsèque sont particulièrement adaptés, car ils privilégient la réparation des petits défauts.

Malgré les grands progrès réalisés sur les matériaux autocicatrisants, plusieurs défis restent à relever. En particulier, comment ces matériaux se comporteront-ils en cas d'exposition durable à des environnements agressifs ? La plupart des travaux se sont jusqu'ici bornés à étudier la réaction de ces matériaux à des fractures statiques, et n'ont pas étudié les aspects

dynamiques de l'autocicatrisation dans des conditions de fatigue.

Pourtant, pour que le concept d'autocicatrisation s'impose, il faudra aboutir à des applications commerciales. Cela commencera probablement par les revêtements qui ne nécessitent que des performances mécaniques modestes, comparées à celles des éléments plus massifs.

L'autocicatrisation pourrait aussi concerner des propriétés autres que mécaniques. Par exemple, une restauration spontanée de la conductivité électrique serait intéressante dans les domaines de la microélectronique et du stockage de l'énergie. Plusieurs équipes, dont la nôtre, ont obtenu des résultats encourageants dans cette direction.

La restauration de propriétés optiques est une autre voie de recherche prometteuse. Dans un matériau transparent, les fissures diffusent la lumière et perturbent la transparence. Un système autocicatrisant qui réparerait la fissure en la comblant avec un polymère de même indice optique que le matériau permettrait d'atténuer cet effet indésirable.

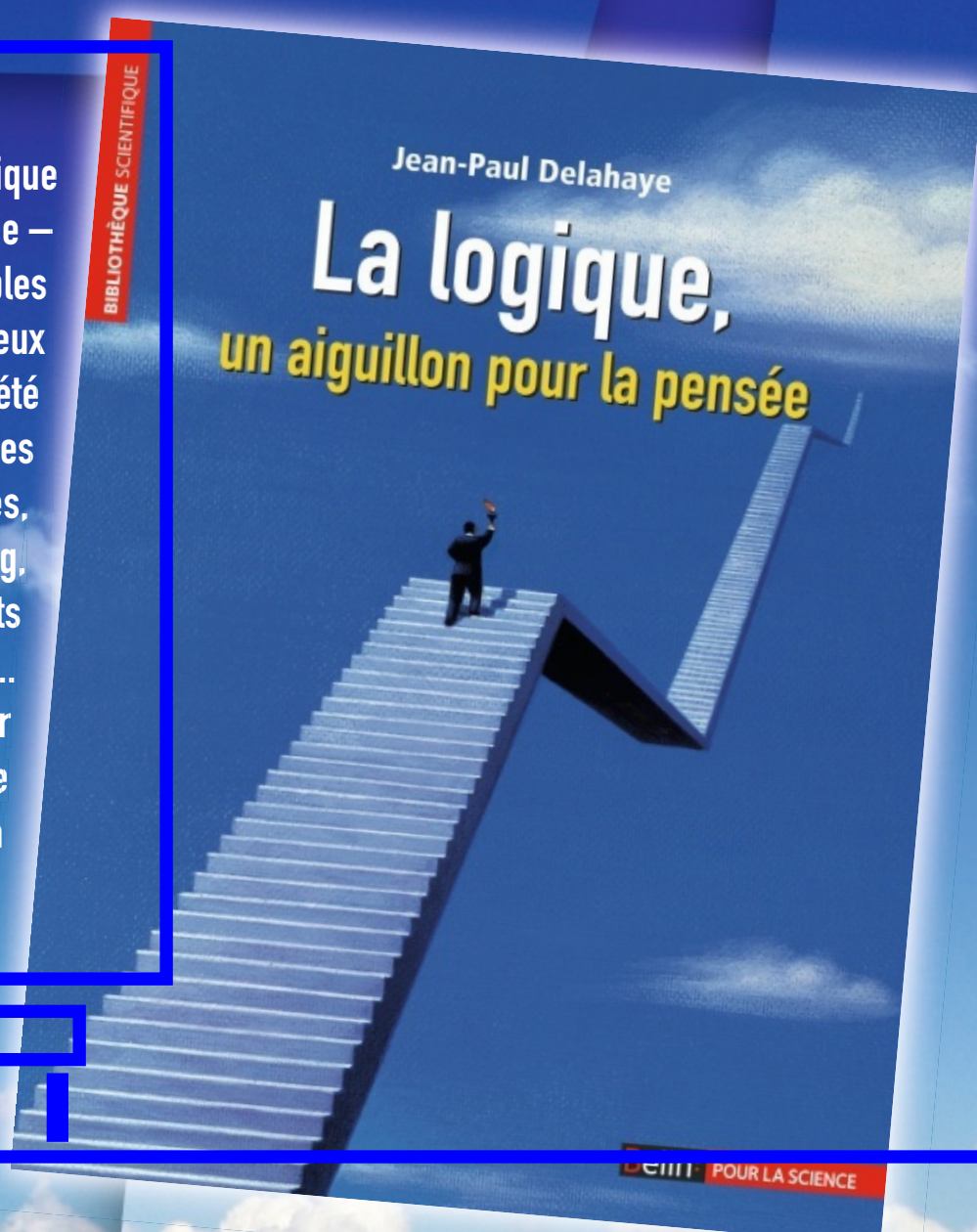
Quels que soient les matériaux utilisés, la mise en œuvre du concept d'autocicatrisation devrait améliorer la sécurité des dispositifs technologiques, prolonger leur durée d'utilisation, diminuer les coûts d'entretien. Des piles et des circuits électroniques auto-réparants et donc plus sûrs, des revêtements pour automobiles ne craignant pas les rayures, des pneus qui se referment en cas de fissuration ou de crevaisson, des tissus résistant à la décoloration, etc. : les perspectives qu'ouvre l'autocicatrisation sont innombrables.

# La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

La logique  
— prise au sens large —  
a connu d'incroyables  
progrès depuis deux  
siècles : l'infinie variété  
des infinis, les étranges  
hyperensembles,  
l'indécidabilité de Turing,  
les déconcertants  
paradoxes probabilistes...  
Cet ouvrage sur  
la logique moderne  
des sciences intéressera  
autant mathématiciens  
que philosophes et curieux,  
intrigués par le monde  
abstrait des ensembles.

Éditions Belin/Pour la Science 2012  
200 pages — 27 euros — ISBN 978-2-8426-5115-8



Disponible en librairie et sur [www.pourlascience.fr/librairie](http://www.pourlascience.fr/librairie)



Physiologie

# Les limites de l'apnée

Michael Parkes

On ne peut retenir longtemps sa respiration. Un mécanisme physiologique oblige à respirer à nouveau, bien avant que le manque d'oxygène ne menace le fonctionnement du cerveau.

## L'ESSENTIEL

✓ Les conséquences d'un arrêt prolongé de la respiration sont difficiles à étudier, tant chez l'homme pour des raisons éthiques évidentes que chez l'animal qui ne bloque pas sa respiration à la demande.

✓ Diverses expériences anciennes ont montré que l'on ne peut s'empêcher d'inspirer après un arrêt volontaire de la respiration, bien avant que le cerveau ne manque d'oxygène.

✓ Le signal impérieux qui oblige à reprendre sa respiration traduit une fatigue excessive du muscle qui contrôle l'apnée : le diaphragme.

Inspirer profondément et tenter votre respiration. Combien de temps allez-vous tenir ainsi ? En moyenne, nous respirons environ 12 fois par minute. La respiration et les battements du cœur sont deux rythmes biologiques à la fois vitaux et automatiques. Le cerveau ajuste le rythme respiratoire aux besoins de l'organisme, sans que nous en ayons conscience. En revanche, s'il est difficile d'influer volontairement sur le rythme cardiaque, nous pouvons retenir notre respiration délibérément pendant de courtes périodes. Cette aptitude présente un avantage pour éviter que de l'eau ou des poussières ne pénètrent dans les poumons, pour se préparer avant un effort musculaire et pour prolonger le temps pendant lequel nous pouvons parler sans interruption. Ainsi, retenir sa respiration est facile, comprendre pourquoi est bien plus difficile. Au fait, n'hésitez pas à recommencer à respirer normalement, si vous ne l'avez déjà fait !

## Retenir sa respiration : combien de temps ?

Qu'est-ce qui détermine la durée pendant laquelle nous pouvons arrêter de respirer ? Bien que tous les mammifères en soient capables, personne n'a encore trouvé comment persuader des animaux de laboratoire de retenir leur respiration à la demande pendant plusieurs secondes. Par conséquent, on ne peut étudier que chez l'homme ce qui se passe quand on arrête de respirer. Si le cerveau manque d'oxygène pendant longtemps, le sujet perd connaissance et des lésions cérébrales, voire la mort, peuvent survenir. Ces risques sont incompatibles avec les expériences que l'on pourrait envisager. De fait, certaines études réalisées il y a plusieurs dizaines d'années ne peuvent être répétées, car elles violeraient les normes de sécurité et d'éthique en vigueur aujourd'hui. Cependant, les biologistes ont trouvé comment répondre en partie aux questions que pose l'arrêt de la respiration. Non seulement on comprend mieux certains aspects de la physiologie humaine, mais ces découvertes pourraient aussi aider à sauver des vies.

En 1949, le physiologiste Hermann Rahn, de la Faculté de médecine de l'Université de Buffalo, aux États-Unis, a utilisé une combinaison de méthodes inhabituelles pour retenir sa respiration pendant presque 14 minutes : ralentir son métabolisme, hyperventiler, c'est-à-dire respirer très rapi-

demment, pour encore remplir ses poumons d'oxygène pur. De même, Edward Schneider, un pionnier de la recherche sur le blocage de la respiration, à l'École militaire de médecine aéronautique, à Mitchel Field, dans le New Jersey, a décrit un sujet ayant retenu sa respiration pendant 15 minutes et 13 secondes dans des conditions comparables, dans les années 1930.

De études et l'expérience quotidienne suggèrent qu'après avoir gonflé les poumons au maximum, nous ne pouvons généralement pas retenir notre respiration plus d'une minute environ. Pourtant, les poumons seuls contiennent en théorie suffisamment d'oxygène pour assurer le métabolisme pendant près de quatre minutes. Le même, le dioxyde de carbone (le produit de dégradation fabriqué par le métabolisme cellulaire, et évacué par l'air expiré) ne s'accumule pas assez vite dans le sang pour y atteindre des concentrations toxiques au bout d'une minute.

Ajoutons un autre élément surprenant : les plongeurs peuvent rester en apnée plus longtemps, en partie parce qu'il existe une motivation accrue (un réflexe de survie) qui permet d'éviter que l'eau n'envahisse les poumons. Les mammifères et les oiseaux aquatiques présentent un réflexe de plongée qui ralentit la vitesse du métabolisme pendant que la respiration est bloquée sous l'eau, mais on ignore si c'est aussi le cas chez l'homme. Toutefois, comme dans le cas précédent, les plongeurs qui retiennent leur respiration sont obligés de reprendre leur respiration bien avant d'avoir épuisé leur réserve.

## Un signal impérieux

Comme l'avait observé Schneider : « Il est pratiquement impossible pour un homme de retenir volontairement sa respiration jusqu'à perdre connaissance. » Un évanouissement peut survenir dans des circonstances exceptionnelles, lors de compétitions de plongées extrêmes, voire chez certains enfants, qui semblent pouvoir retenir leur respiration assez longtemps pour s'évanouir. Diverses études en laboratoire ont confirmé que cela ne peut arriver chez des adultes. Bien avant qu'un manque d'oxygène ou un excès de dioxyde de carbone ne puisse endommager le cerveau, un signal nous oblige à inspirer à nouveau.

Comment expliquer ce signal ? Des capteurs spécialisés enregistrent les changements physiologiques associés

au blocage de la respiration et déclencheraient l'inspiration avant que le cerveau ne souffre. Il pourrait s'agir des capteurs qui surveillent le volume des poumons et de la poitrine ou détectent les concentrations trop basses d'oxygène ou trop élevées de dioxyde de carbone dans le sang et dans le cerveau. Pourtant, cela ne semble pas être le cas. L'implication des capteurs contrôlant le volume des poumons a été exclue par différentes expériences conduites entre 1960 et 1990 par Helen

Harty et John Eisele, travaillant à l'Hôpital Charing Cross de Londres, et par Patrick Flume et l'Université de Caroline du Nord à Chapel Hill. Leurs expériences ont montré que des patients ayant subi une transplantation de poumons, et dont les connexions nerveuses entre les poumons et le cerveau avaient été sectionnées, ni les patients sous rachianesthésie totale, dont les récepteurs sensoriels des muscles de la poitrine étaient bloqués, ne pouvaient retenir longtemps leur respiration.

Les recherches semblent également exclure l'intervention des capteurs chimiques (chimiorécepteurs) de l'oxygène et du dioxyde de carbone. Chez l'homme, les seuls chimiorécepteurs connus détectant les faibles concentrations d'oxygène dans le sang sont situés juste sous la mâchoire dans les artères carotides, qui alimentent le cerveau en oxygène. Les chimiorécepteurs détectant une augmentation des concentrations de dioxyde de carbone dans le sang sont localisés dans les artères carotides et dans le tronc cérébral, lequel contrôle la respiration régulière et les autres fonctions autonomes (non volontaires).

Si les chimiorécepteurs imposaient la reprise de la respiration après un arrêt volontaire, alors en leur absence, on devrait pouvoir retenir sa respiration jusqu'à perdre connaissance. Toutefois, des expériences réalisées par l'équipe de Karlman Wasserman à l'Université de Californie, à Los Angeles, ont montré que ce n'est pas possible même quand les connexions nerveuses entre les chimiorécepteurs localisés dans les artères carotides et le cerveau sont interrompues.

En outre, si des concentrations anormales d'oxygène (trop basses) ou de dioxyde de carbone (trop élevées) déclenchaient la reprise de la respiration, il serait impossible de retenir sa respiration au-delà de ces seuils. Or de nombreuses études ont montré que ce n'est pas le cas. De surcroît, après la reprise de la respiration, il serait impossible de s'arrêter à nouveau de respirer tant que les concentrations d'oxygène et de dioxyde de carbone ne seraient pas revenues normales. Cela ne semble pas non plus être le cas.

Ces diverses expériences suggèrent que le besoin de respirer serait lié à l'activité musculaire liée à la respiration et non pas directement à l'échange des gaz. Lorsque la poitrine est gonflée, elle tend naturellement à se dégonfler, à moins que les muscles assurant l'inspiration ne la maintiennent dans l'état gonflé. On a donc commencé à chercher des réponses dans les contrôles neurobiologiques et mécaniques que l'organisme exerce sur ces muscles inspirateurs. Dans le cadre de ces travaux, il s'agissait aussi de tester si le blocage de la respiration fait intervenir un arrêt volontaire de la respiration autonome, ou s'il agit directement sur les muscles de la respiration en les empêchant d'imposer le rythme respiratoire.

## REtenir SA RESPIRATION : JUSQU'OU ?

Quand on retient sa respiration, il existe un moment où l'on ne peut s'empêcher de respirer à nouveau. On peut s'entraîner à bloquer sa respiration de plus en plus longtemps, tout comme on s'entraîne à la méditation. La concentration en oxygène dans le sang diminue et celle de dioxyde de carbone augmente. On ignore encore ce qui nous oblige à reprendre notre respiration après l'avoir suspendue volontairement quelques instants. Du moins certaines possibilités ont-elles été exclues, comme il est expliqué ci-dessous.

### Le rôle des chimiorécepteurs sensibles au dioxyde de carbone et à l'oxygène ne serait pas déterminant.

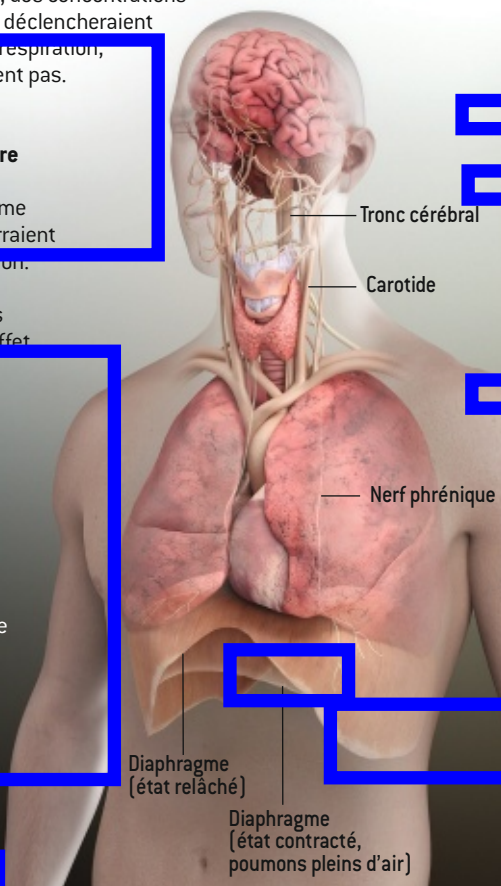
Il existe des structures sensorielles sensibles aux concentrations d'oxygène dans le sang, localisées dans les artères carotides. Des capteurs sensibles au dioxyde de carbone existent aussi dans les carotides et dans le tronc cérébral. Les échanges de ces gaz étant contrôlés par la respiration, on a étudié si ces capteurs commandaient la reprise de la respiration après un arrêt, mais il n'en est rien. Si c'était le cas, des concentrations anormales de ces gaz dans le sang déclencheraient systématiquement la reprise de la respiration, ce que les expériences ne confirment pas.

### Les capteurs du volume pulmonaire ne semblent pas jouer un rôle clé.

Des capteurs qui contrôlent le volume de la poitrine ou des poumons pourraient déclencher la reprise de la respiration. Mais des expériences où les nerfs correspondants ont été sectionnés ou paralysés n'ont montré aucun effet.

### Le rôle du diaphragme serait déterminant.

Des signaux nerveux transmis par le diaphragme au cerveau semblent être l'hypothèse la plus plausible. On suppose que le diaphragme, qui se contracte pour remplir les poumons, envoie des signaux de détresse au cerveau lui indiquant que la respiration est bloquée. Le cerveau analyse toutes les informations qui lui parviennent et déciderait à quel moment la respiration doit impérativement reprendre.



Le rythme de la respiration se met en place dès que le tronc cérébral envoie des impulsions *via* les deux nerfs phréniques vers le diaphragme, un muscle en forme de couloir situé sous les poumons, lui commandant de se contracter ou de se détendre. Quand il ne reçoit plus d'impulsions, le diaphragme se relâche et les poumons se dégonflent. En d'autres termes, un schéma cyclique d'activité nerveuse (un rythme respiratoire central) reflète le rythme respiratoire. Chez l'homme, il est impossible de mesurer ce rythme central directement à partir des nerfs phréniques ou du tronc cérébral (le sujet n'y survivrait pas!). Dès lors, les chercheurs ont conçu des moyens d'enregistrer le rythme respiratoire central de façon indirecte : ils surveillent l'activité électrique du diaphragme, la pression dans les voies respiratoires ou diverses modifications dans le système nerveux autonome, par exemple les changements du rythme cardiaque (nommés arythmie sinusale respiratoire).

## L'activité rythmique du diaphragme

En travaillant sur ces mesures indirectes, Emilio Agostoni, de l'Université de Milan, a montré en 1963 qu'il pouvait détecter un rythme respiratoire central chez des personnes retenant leur respiration. Dans des expériences similaires menées à l'Université de Birmingham en Angleterre, en 2003 et 2004, Hannah Cooper, l'anesthésiste Thomas Clutton-Brock et moi-même avons utilisé l'arythmie sinusale respiratoire pour montrer que le rythme respiratoire central ne s'arrête jamais : il persiste pendant toute la durée de l'arrêt de la respiration. On en déduit que l'apnée doit inhiber l'activité rythmique du diaphragme, sans doute par une contraction volontaire continue de ce muscle. Différentes expériences semblent avoir exclu l'intervention d'autres muscles participant à la respiration normale. Ainsi, la reprise de la respiration dépendrait d'une rétroaction sensorielle du diaphragme vers le cerveau, indiquant à quel moment la « fatigue » du muscle n'est plus supportable.

Si tel est le cas, paralyser le diaphragme et, par conséquent, supprimer la rétroaction sensorielle vers le cerveau, devrait permettre aux sujets de prolonger notablement la durée pendant laquelle ils peuvent cesser de respirer. C'est ce qu'ont voulu vérifier Edward Campbell et ses collègues à

l'Hôpital Hammersmith à Londres à la fin des années 1960. Deux volontaires sains et conscients ont accepté que tous leurs muscles squelettiques soient paralysés temporairement par une injection intraveineuse de curare, à l'exception de ceux d'un avant-bras, ce qui leur permettait de communiquer. Pendant l'expérience, les sujets ont été placés sous respiration artificielle ; le blocage de la respiration a été simulé par l'arrêt de la ventilation et les sujets ont signalé avec leur main non anesthésiée le moment où ils voulaient que la ventilation soit rétablie.

## La paralysie du diaphragme prolonge l'apnée

Les résultats furent étonnants. Les deux volontaires laissèrent la ventilation débranchée pendant environ quatre minutes, durée au bout de laquelle l'anesthésiste est intervenu pour dissiper les effets du curare parce que la concentration de dioxyde de carbone avait dangereusement augmenté. Après dissipation des effets du curare, les deux sujets ont indiqué qu'ils ne ressentent pas de symptômes pénibles de suffocation ou de malaise.

Pour des raisons évidentes, une expérience aussi audacieuse n'a pas été répétée souvent. Quelques autres chercheurs ont essayé, mais n'ont pas réussi à reproduire les résultats de Campbell. Les volontaires ont demandé à respirer à nouveau après une durée si courte que leurs concentrations de dioxyde de carbone étaient à peine supérieures à la normale. Les sujets ont peut-être décidé de terminer l'expérience en raison de la gêne causée par l'intubation, la mesure de sécurité qui n'avait pas été mise en œuvre dans l'expérience de Campbell, et parce qu'ils avaient davantage conscience du risque encouru.

Néanmoins, quelques expériences tout aussi remarquables réalisées par Mark Noble, à l'Hôpital Charling Cross dans les années 1970, semblent confirmer que la paralysie du diaphragme prolonge la durée de l'apnée. Au lieu d'une paralysie totale des muscles squelettiques, M. Noble et ses collègues ont paralysé uniquement le diaphragme, en anesthésiant les deux nerfs phréniques, ce qui était beaucoup moins dangereux pour les sujets. Cette anesthésie spécifique a doublé la durée moyenne de l'apnée et réduit les

### L'AUTEUR

Michael PARKES, professeur de physiologie à l'École des sciences du sport, travaille au Centre de recherches cliniques *Wellcome Trust* à la Faculté de médecine de Birmingham, en Grande-Bretagne.

### ✓ BIBLIOGRAPHIE

- C. Gestreau *et al.*, Task2 potassium channels set central respiratory CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> sensitivity, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 107(5), pp. 2325-2330, 2010.
- A. Bianchi et C. Gestreau, The brainstem respiratory network: An overview of a half-century of research, *Respir. Physiol. Neurobiol.*, vol. 168(1-2), pp. 4-12, 2009.
- M. Parkes, Breath holding and its breakpoint, *Experimental Physiology*, vol. 91, n° 1, pp. 1-15, 2006.
- H. Cooper *et al.*, Contribution of the respiratory rhythm to sinus arrhythmia in normal unanesthetized subjects during positive-pressure mechanical hyperventilation, *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, vol. 286, n° 1, pp. H412-H411, 2004.
- H. Cooper *et al.*, CO<sub>2</sub>-dependent component of sinus arrhythmia from the start of breath holding in humans, *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, vol. 285, n° 4, pp. H841-H848, 2003.
- S. Shea, Behavioral and arousal-related influences on breathing in humans, *Experimental Physiology*, vol. 81, n° 1, pp. 1-2, 1996.

sensation habituelles de malaise accompagnant une absence de respiration.

Les différents résultats semblent confirmer l'hypothèse qu'une contraction volontaire du diaphragme permet de bloquer la respiration en maintenant la poitrine gonflée. Le moment où le sujet reprend sa respiration dépend des stimuli émis par le diaphragme contracté et qui parviennent au cerveau.

d'une contraction anormalement longue, le cerveau perçoit les signaux inhabituels émis par le diaphragme. Initialement un peu douloureux, ils finissent par devenir insupportables, déclenchant la reprise de la respiration. Le rythme automatique que reprend ensuite le contrôle

Cette hypothèse n'est pas totalement validée, mais elle concorde bien avec les observations de Fowler (selon les

toute interruption du blocage de la respiration par le relâchement du diaphragme peut être suivie d'un autre blocage) et avec les effets du gonflement des poumons sur la durée de l'apnée. Le relâchement du diaphragme même bref et une légère expiration retarderaient la reprise de la respiration en atténuant les signaux des capteurs de distension dans le diaphragme.

## Le signal de reprise : une fatigue excessive du diaphragme

**LES SECRETS DES CHAMPIONS**

Les personnes qui parviennent à retenir longtemps leur respiration mettent généralement en œuvre quatre principes clés décrites ci-dessous. Mais retenir sa respiration pendant longtemps présente des risques : perte de connaissance, lésions cérébrales, voire décès. Ces expériences doivent toujours être pratiquées en présence d'une assistance médicale.

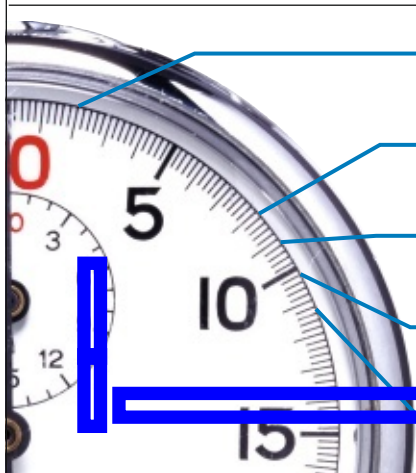
**REMPLIR LES POUMONS AU MAXIMUM** : certains athlètes gonflent leurs poumons au-delà du volume maximal normal grâce à une technique nommée pompage buccal, consistant à inspirer un maximum d'air en pratiquant des mouvements répétés de la mâchoire inférieure et de la gorge. Une pression trop élevée dans les poumons risque d'entraîner une embolie gazeuse, c'est-à-dire la formation de bulles d'air dans le sang, pouvant endommager certains vaisseaux sanguins, voire le cerveau.

**RALENTIR SON MÉTABOLISME** : au repos, le métabolisme humain consomme environ 0,36 litre d'oxygène par minute. En jeûnant pendant 12 heures et en restant allongé, mais éveillé, on peut abaisser la consommation d'oxygène à 0,27 litre par minute, ce qui permet de tenir plus longtemps sans inspirer (33 pour cent de plus).

**INHALER DE L'OXYGÈNE PUR** : l'air inspiré ne contient qu'environ 21 pour cent d'oxygène. Des études montrent que l'inhalation d'oxygène pur permet de doubler la durée passée sans respirer. Toutefois, certaines régions des poumons risquent de s'effondrer sur elles-mêmes quand tout l'oxygène qu'elles contenaient a été consommé.

**L'HYPERVENTILATION** : avant de retenir sa respiration, on peut respirer en accélérant volontairement le rythme respiratoire. Cela permet de réduire notablement la concentration de dioxyde de carbone dans le sang. Dans certaines études, cela a permis de doubler le temps durant lequel un sujet peut bloquer sa respiration. Toutefois, l'hyperventilation tend à accélérer la consommation d'oxygène par l'organisme et à augmenter la production de dioxyde de carbone. De plus, elle limite l'approvisionnement du cerveau en sang et inhibe certains réflexes qui protègent le cerveau contre un manque d'oxygène.

### RECORDS\*



#### 1:00 minute

Temps pendant lequel une personne peut en général retenir sa respiration hors de l'eau

#### 8:06 minutes

Martin Stépánek  
3 juillet 2001, Miami

#### 9:04 minutes

Herbert Nitsch  
13 décembre 2006, Hurghada, Égypte

#### 10:12 minutes

Tom Sietas  
7 juin 2008, Athènes, Grèce

#### 11:05 minutes

Stéphane Mifsud  
8 juin 2009, La Crau, France

\*Réalisés immobile, visage tourné vers le bas, dans de l'eau, sans inhalation préalable d'oxygène pur

L'augmentation de la concentration d'oxygène et la diminution de celle du dioxyde de carbone dans le sang accroîtraient également la durée de l'apnée, en réduisant les indicateurs biochimiques de fatigue du diaphragme. Tout ce qui empêche le cerveau de surveiller ces informations, par exemple le blocage des nerfs reliant le diaphragme au cerveau, augmente la durée. La tolérance du cerveau à ces signaux désagréables dépend également de l'humour, de la motivation et de la capacité à penser à autre chose, par exemple à se concentrer sur des opérations de calcul mental pendant l'apnée.

Cette hypothèse est l'explication la plus simple s'appliquant aux diverses observations expérimentales. Certaines de ces expériences comprenaient un nombre trop faible de sujets pour être généralisées, mais elles ne rempliraient pas les critères éthiques en vigueur pour être reproduits aujourd'hui.

En outre, M. Noble et ses collègues ont réalisé une autre expérience spectaculaire qui ne pourra être répétée pour des raisons éthiques. Ils ont triplé la durée de blocage de la respiration chez trois sujets sains en anesthésiant deux ensembles de nerfs crâniens (les nerfs vagues, qui vont du cerveau à la poitrine et à l'abdomen, et les nerfs glossopharyngiens, reliés à la glotte, au larynx et diverses régions de la gorge). Ces résultats ne semblent pas impliquer le diaphragme, sauf qu'il est possible que les nerfs vagues transmettent eux aussi des signaux provenant du diaphragme. Il paraît moins vraisemblable que le larynx contienne lui-même un muscle intervenant dans le blocage de la respiration ; en 1993, lorsque le chirurgien australien Martyn Mendelsohn, à Sydney, a examiné la glotte (à l'aide d'une caméra insérée dans une trachéotomie), il a constaté

Le réseau neuronal respiratoire, ou oscillateur central, situé dans le tronc cérébral est capable d'assurer à lui seul l'activité respiratoire automatique. Mais certains comportements impliquent de reprendre sa respiration : pour plonger en apnée, prolonger l'expiration pour faire vibrer ses cordes vocales et terminer une longue phrase, ou encore nager. L'oscillateur central déclenche alors une commande volontaire des muscles respiratoires qui prend le dessus sur l'oscillateur central.

Outre les expériences mentionnées par M. Parkes, il est quasi impossible à reproduire aujourd'hui pour des raisons éthiques, les recherches conduites chez les rongeurs ont permis de décrire de nombreux réflexes permettant de stopper l'oscillateur respiratoire du tronc cérébral. Parmi les mécanismes les plus puissants capables de provoquer une apnée réflexe (non volontaire), citons la stimulation des récepteurs sensoriels de l'arrière-gorge (cavités du pharynx et du larynx) ou des fibres nerveuses sensitives qui en sont issues, tels les nerfs laryngés supérieurs. Cette stimulation se produit naturellement lors de l'ingestion d'aliments ou de boissons. Ce déclenchement réflexe de l'apnée résulte d'une inhibition rapide et puissante de l'inspiration contrôlée par l'oscillateur central.

d'avaler de travers. Ce réflexe de protection vise à préserver l'intégrité des poumons et à maintenir le libre passage de l'air dans la trachée et les

poumons. Ces mécanismes d'apnée réflexe entraînent une pause du réseau respiratoire, stoppant l'oscillateur central. Cependant, l'oscillateur échappe rapidement à l'inhibition (en quelques dizaines de secondes), et la respiration redémarre.

Il est donc vraisemblable que l'apnée volontaire du plongeur s'accompagne d'une inhibition de l'oscillateur central exercée par le cortex pendant une courte durée. Par conséquent, le maintien de l'apnée nécessiterait une inhibition des neurones moteurs reliés aux muscles du thorax (diaphragme et muscles intercostaux), mais aussi des voies aériennes supérieures (langue, pharynx, larynx). Toutefois, cette hypothèse, qui reste à confirmer, implique que les neurones moteurs qui innervent le diaphragme reçoivent d'une source d'excitation normale venant de l'oscillateur central et une commande inhibitrice venant du cortex, qui doit être plus forte que la première.

Par ailleurs, il existe un modèle animal qui pourrait fournir un début d'explication à cette énigme neurophysiologique. Une lignée particulière de souris (C57BL/6J) fait des apnées spontanées et assez fréquentes (une à deux par minute). L'enregistrement des nerfs qui commandent la

présence d'une décharge nerveuse de faible amplitude pendant toute la durée de l'apnée à la fois pour le diaphragme et pour le larynx. Ces obser-

vations plaident en faveur d'une contraction du diaphragme et du larynx.

Un autre mécanisme utilisé par les plongeurs après les souhaitant repousser leurs limites confirmerait que le larynx joue bien un rôle dans le contrôle volontaire de la respiration : déglutir prolonge le temps d'apnée. En effet, le cycle respiratoire est interrompu pendant la déglutition et la phase expiratoire suivant le mouvement de déglutition est prolongée de façon réflexe. Cette dernière phase s'accompagne d'une inhibition du larynx et du diaphragme, ce qui entraîne la fatigue. Ces interactions nerveuses du tronc cérébral permettraient au plongeur de gagner environ une seconde de temps d'apnée à chaque déglutition.

Enfin, soulignons un dernier facteur parmi tous ceux que le cerveau doit analyser pour « décider » la reprise de la respiration après une apnée. Notre modèle animal nous a permis de montrer qu'il existe dans le tronc cérébral des chimiorécepteurs sensibles au dioxyde de carbone et à l'oxygène. Ces neurones du noyau reticulopontaire sont essentiels dans la stimulation de l'oscillateur central et donc dans la reprise de la respiration après un arrêt volontaire.

**Christian Gestreau,**

Centre de recherche en neurobiologie et neurophysiologie de Marseille

qu'elle restait souvent ouverte pendant toute la durée de l'apnée. Cette observation semble confirmer que le diaphragme joue un rôle clé.

## Des applications en médecine

Une meilleure compréhension de la capacité à reprendre sa respiration a des applications en médecine. Ainsi, les femmes atteintes d'un cancer du sein subissent des séances de radiothérapie, durant lesquelles il faut irradier la tumeur en administrant des doses létales, sans endommager les tissus sains aux alentours. Cette opération nécessite une exposition aux rayonnements de plusieurs minutes, pendant lesquelles la patiente doit essayer de maintenir sa poitrine immobile. Comme on ne peut pas lui demander de ne pas respirer pendant si longtemps, on administre généralement de courtes rafales de rayonnements entrecoupées de pauses, permettant

où la poitrine bouge le moins. Avec plusieurs collègues oncologues et radiothérapeutes, nous avons commencé à tester s'il serait possible de prolonger suffisamment le blocage de la respiration pour améliorer la radiothérapie.

Mieux connaître les mécanismes impliqués dans le blocage de la respiration pourrait également être précieux pour les forces de l'ordre lorsqu'elles maîtrisent des suspects. Chaque année partout dans le monde, certaines personnes ainsi maîtrisées meurent accidentellement. L'augmentation de la vitesse du métabolisme, la compression de la poitrine, la diminution de la concentration d'oxygène et l'augmentation de celle du dioxyde de carbone dans le sang, tous ces paramètres raccourcissent la durée du blocage de la respiration d'une personne. Ainsi, quelqu'un qui est encloué, qui s'est battu et qui est maintenu à terre par la force peut avoir besoin de reprendre sa respiration plus vite que quelqu'un qui est détendu.

En 2000, Andrew Cummin et son équipe de l'Hôpital Charing Cross ont étudié chez huit sujets sains qui avaient fait un tour de vélo, les conséquences d'une expiration maximale, suivie d'un blocage de la respiration : les sujets n'ont pu rester sans respirer plus de 15 secondes, la quantité moyenne d'oxygène dans leur sang a fortement chuté et chez deux d'entre eux les battements cardiaques sont devenus irréguliers. Les chercheurs en ont conclu qu'un « arrêt de la respiration pendant de courtes périodes lors d'une immobilisation vigoureuse peut expliquer des morts subites ». Les autorités policières britanniques ont rédigé des directives précises quant à l'utilisation de l'immobilisation par la force.

Ce type d'investigations apporte également de nouvelles informations sur la physiologie humaine. Par ailleurs, le diaphragme, muscle un peu négligé, devrait susciter un regain d'intérêt et nous livrer de nouvelles informations... à couper le souffle !

# Tornades

## Des alertes plus précoces

Grâce à de nouveaux radars et satellites, il sera possible de mieux anticiper la formation des tornades et ainsi d'épargner de nombreuses vies.

Jane Lubchenco et Jack Hayes

**A**u grand silence succède un silence sinistre dans la ville de Joplin dans le Missouri. Puis, dans un hurlement, les tentacules d'une gigantesque tornade émergent d'un ciel sombre. Des vents dépassant 320 kilomètres par heure entaillent la ville sur plus d'un kilomètre de large et presque dix de long, détruisant les écoles, un hôpital, des entreprises et des maisons, et faisant plus de 160 victimes sur leur passage.

Près de 20 minutes avant que la tornade ne frappe, en ce dimanche après-midi du 22 mai 2011, le Service météorologique fédéral avait émis un avertissement. Cela faisait des jours que les prévisions météorologiques annonçaient de mauvaises conditions et la vigilance aux tornades était en place depuis plusieurs heures. L'alerte avait été donnée plus tôt que d'habitude. Mais cela n'était pas encore suffisant, car si les services d'intervention d'urgence étaient en état d'alerte avancée, beaucoup d'habitants ignoraient ce qui allait se passer.

La tornade qui s'est abattue sur la ville de Joplin n'est qu'une des nombreuses tragédies qui ont endeuillé les États-Unis durant le printemps 2011. Un mois plus tôt, une série de violentes tornades dévastaient plusieurs zones du Sud, tuant plus de 300 personnes. Il y eut plus de 750 tornades pour le seul mois d'avril : un record.

En 2011, les tornades ont fait près de 550 victimes, la quatrième année la plus meurtrière dans l'histoire des États-Unis. La facture matérielle, elle aussi, a été considérable. Les tornades du mois

de mai (dont celle de Joplin), les tempêtes de neige et les inondations causées par des ouragans, ont coûté à chaque événement plus de un milliard de dollars. Et le rythme ne semble pas faiblir en 2012.

Les outils de prévision d'événements climatiques extrêmes ont beaucoup évolué au cours des dernières décennies. Les chercheurs et les ingénieurs de la NOAA, l'organisme américain chargé de l'étude des océans et de l'atmosphère veulent encore accroître la capacité des radars, des satellites et des supercalculateurs à anticiper les tornades, à prévoir les inondations et l'intensité des ouragans. Si les efforts portent leurs fruits, dans dix ans, la population sera avertie une heure avant qu'une survienne, par exemple, une violente tornade. Les habitants auront le temps de réagir, de rassembler leur famille et de se mettre à l'abri.

## Des radars plus performants

Le météorologue Doug Forsyth dirige les programmes mis en place pour améliorer les techniques des radars, qui ont un rôle important dans les prévisions météorologiques. Travaillant dans un laboratoire de la NOAA, à Norman dans l'Oklahoma, il cherche à allonger les délais d'alerte qui précèdent les tornades. En effet, les plus meurtrières se forment très rapidement et le radar est le principal outil permettant aux prévisionnistes de les détecter.

Un radar fonctionne en émettant des ondes radio qui sont réfléchies par

## L'ESSENTIEL

✓ De meilleures prévisions météorologiques permettront d'anticiper les tempêtes.

✓ Des nouvelles générations de radars et de satellites, complétées par des modèles numériques plus précis, surveilleront mieux les tornades.

✓ Ces améliorations devraient donner les moyens de prévenir les populations près d'une heure avant l'arrivée de la tornade.

David Maynew

## SÉRIEUX AVERTISSEMENTS

Beaucoup de personnes ont péri en mai 2011 lors des tornades qui ont frappé la ville de Joplin, dans le Missouri, en raison de la violence des intempéries (voir les photographies aériennes page ci-contre). Or bien des vies auraient pu être épargnées si la population avait eu le temps de s'abriter en lieu sûr. Van-kita Brown, sociologue à la NOAA, a travaillé avec les équipes du Service météorologique des États-Unis pour identifier ce qui aurait pu inciter les citoyens à agir. Ils ont décou-

vert que de nombreux citoyens n'ont pas réagi après avoir entendu la première sirène ou la première alerte à la tornade. En fait, elles ont

attendu qu'une nouvelle leur soit confirmée par d'autres sources. Ce n'est qu'après avoir entendu plusieurs sirènes qu'ils ont cherché un abri. D'autres n'ont tout simplement pas pris ce risque assez sérieux.

Comme l'explique V. Brown, la plupart des gens pensent que des événements graves, mais peu fréquents, tels que les tornades et les ouragans ne les concernent pas personnellement. On ne passe du sentiment d'être « en sécurité » à celui d'être « en danger » qu'après

la tornade de Joplin, la NOAA a appelé à un débat sur la façon dont on pouvait organiser le pays pour

être prêt à affronter les risques météorologiques.

Les États de plusieurs états des met... l'accent sur un certain nombre de dispositions susceptibles de persuader les gens à agir en cas d'alerte. À la radio et à la télévision, les météorologues peuvent indiquer avec précision la localisation d'une tempête sur le point de se déclencher. Parce que les personnes ont davantage tendance à entrer en action si elles voient des images s'activer, ceux

courage cette attitude en actualisant leur propre page Facebook et son propre compte Twitter – une mesure prise actuellement – et en mettant en avant les alertes via Google Maps. L'Agence fédérale américaine de gestion des urgences et la Commission fédérale des communications ont aussi commencé à diffuser des messages à partir de chaque tour de téléphone à destination de tous les téléphones mobiles se trouvant dans leur périmètre. Asso-

ciés à ces mesures devraient permettre de limiter l'ampleur de ces tragédies.



les particules présentes dans l'atmosphère, telles les gouttes d'eau, la glace, voire les insectes et la poussière. En analysant la puissance du signal réfléchi et le temps écoulé entre l'émission et la réception de l'onde, les prévisionnistes peuvent localiser les précipitations et évaluer l'intensité. Le radar Doppler, utilisé aujourd'hui par le Service météorologique national des États-Unis, mesure également le changement de fréquence du signal réfléchi, ce qui indique la vitesse et la direction du déplacement des précipitation. Grâce à ces informations clés, les météorologues détectent les mouvements de rotation qui s'opèrent à l'intérieur de l'orage et qui annoncent la formation d'une tornade.

En 1973, Rodger Brown, Les Lemon et Don Burgess, des météorologues de la NOAA, ont découvert le potentiel prédictif de ces informations en analysant les données provenant d'une tornade qui avait frappé Union City, dans l'Oklahoma. En observant un cumulonimbus – le type de nuage qui donne les orages et les tornades –, ils avaient remarqué que le radar mesurait des vitesses horizontales de vent extrêmement fortes en direction du radar juste à côté de vitesses de vent aussi élevées dans le sens opposé. L'aspect visuel de cisaillement sur la carte des vents était si extraordinaire que les chercheurs, au début, ne voyaient pas bien ce que cela signifiait. Mais après avoir associé le signal radar et l'emplacement de la tornade, ils ont pu reconnaître la signature tourbillonnaire des tornades (*Tornado*

*Vortex Signature*). Ce phénomène est aujourd'hui le critère le plus utilisé et reconnu pour évaluer la probabilité qu'une tornade soit déjà formée ou qu'elle se développe dans un avenir proche. Ces données ont permis d'allonger le délai d'alerte d'environ trois minutes et demie en 1987 à 14 minutes aujourd'hui.

Bien que le radar Doppler ait déjà été amélioré, il n'est pas parfait. Il ne permet pas aux météorologues de percevoir la nature des particules présentes dans la zone d'intérêt, ce qui permettrait de faire la différence, par exemple, entre une tempête de pluie et une tempête de sable.

### Des radars à vision double

L'une des améliorations essentielles porte le nom de double polarisation. Elle correspond à l'émission simultanée d'ondes électromagnétiques polarisées verticalement et horizontalement. Les prévisionnistes peuvent alors distinguer, avec beaucoup plus de fiabilité, les différents types de précipitation et avoir une idée de leur ampleur. Bien que les gouttes de pluie et les grêlons aient parfois la même largeur – et donc apparaissent identiques sur les images transmises par le radar Doppler –, la double polarisation permet de voir qu'elles n'ont pas la même épaisseur et que les premières sont plus plates. Distinguer les diverses formes des particules réduit le nombre d'hypothèses que le

météorologue doit faire pour interpréter les images radar. Cette approche permet de préciser les prévisions pour savoir, par exemple, si on doit se préparer à de la grêle ou à de la pluie.

Les informations recueillies sur la taille et la forme des particules aident aussi à distinguer les petits débris charriés par le vent et donc la taille donne une estimation de la force de l'orage. Il est ainsi possible d'identifier si une tornade est en train de se former. Les données relatives aux particules sont d'autant plus précieuses qu'une tornade n'est pas toujours directement visible. Elle peut être masquée par une forte pluie ou survenir de nuit. Dans ces conditions, la double polarisation détecte quand même les débris aéroportés.

Le service météorologique des États-Unis est en train d'intégrer la technique de la double polarisation dans ses 160 radars Doppler répartis sur tout le territoire et espère avoir terminé d'ici mi-2013. Ce dispositif est utile également pour surveiller les précipitations lors des ouragans et des tempêtes de neige. En même temps, la NOAA forme son personnel à l'interprétation de ces nouvelles images. Le Bureau des prévisions météorologiques de Newport/Morehead City, en Caroline du Nord, a été le premier à observer un cyclone tropical en utilisant ce type de radar lorsque l'ouragan Irene a frappé la Caroline du Nord en 2011. Au cours de cette tempête, les radars à polarisation double ont permis d'estimer les précipitations avec une meilleure précision que les radars Doppler classiques.



Joplin, Missouri, août 2009



Après le passage de la tornade en mai 2011

Photo image aérienne avec l'aimable autorisation de M.J. Harden, A Geovey Company

siques installés plus au Nord. Cette nouvelle génération de radars a conduit à une bonne anticipation des inondations et a probablement sauvé des vies parce que les populations avaient été prévenues – les régions du Nord, elles, ont déploré une trentaine de victimes.

Selon Pamela Heinselman, météorologue à la NOAA, un autre type de radar de pointe améliorerait notablement les prévisions météorologiques. Ce système s'inspire de celui utilisé par la marine américaine pour détecter et suivre les navires et les missiles ennemis. P. Heinselman est à la tête d'une équipe d'ingénieurs en électricité, de prévisionnistes et de chercheurs en sciences sociales qui travaillent à l'Observatoire national de météorologie radar à Norman dans l'Oklahoma. Leurs travaux portent sur les radars tridimensionnels à balayage électronique. Expliquons de quoi il s'agit.

Les radars Doppler actuels ne sondent qu'une seule direction à la fois, qui correspond à une petite zone du ciel. L'antenne est montée sur un moteur qui la fait tourner de 360 degrés pour un angle d'inclinaison donné par rapport au sol. À chaque tour, elle change d'inclinaison pour sonder un autre secteur de l'atmosphère. Une fois accompli cet échantillonnage du bas vers le haut qui, en période d'orage proche, équivaut à 14 rotations (le sommet d'un système orageux est plus haut que celui d'un système pluvieux et nécessite donc plus de balayages pour atteindre des angles d'inclinaisons plus importants), le radar se repositionne au point de départ

et recommence le processus. Balayer l'ensemble de l'atmosphère dans des conditions climatiques difficiles prend quatre à six minutes avec un radar Doppler.

En revanche, les radars tridimensionnels à balayage électronique émettent plusieurs faisceaux simultanément selon différents angles, ce qui évite de faire varier l'inclinaison des antennes et réduit la durée de balayage à moins d'une minute. Ce gain de temps permettra aux météorologues de détecter des évolutions rapides à l'intérieur de l'orage et, surtout, de commencer à déceler plus vite les changements qui provoquent les tornades.

#### LES AUTEURS



Jack LUBCHENCO dirige la NOAA, l'organisme américain chargé de l'étude des océans et de l'atmosphère.

Jack HAYES dirige le Service météorologique de la NOAA.

#### Des réseaux de satellites

De nombreux spécialistes estiment qu'avec les radars tridimensionnels à balayage électronique le délai d'alerte dépassera 15 minutes, mais il reste encore beaucoup à faire en matière de recherche et développement. L'idéal serait d'équiper le système tridimensionnel à balayage électronique de quatre panneaux (un pour chacun des points cardinaux) qui émettraient et recevraient des ondes radio pour fournir une vue à 360 degrés de l'atmosphère. À Norman, les chercheurs n'ont pour l'instant réalisé que des systèmes à un panneau dédiés à la surveillance météorologique et il faudra au moins une dizaine d'années avant que les radars tridimensionnels à balayage électronique ne deviennent la norme aux États-Unis.

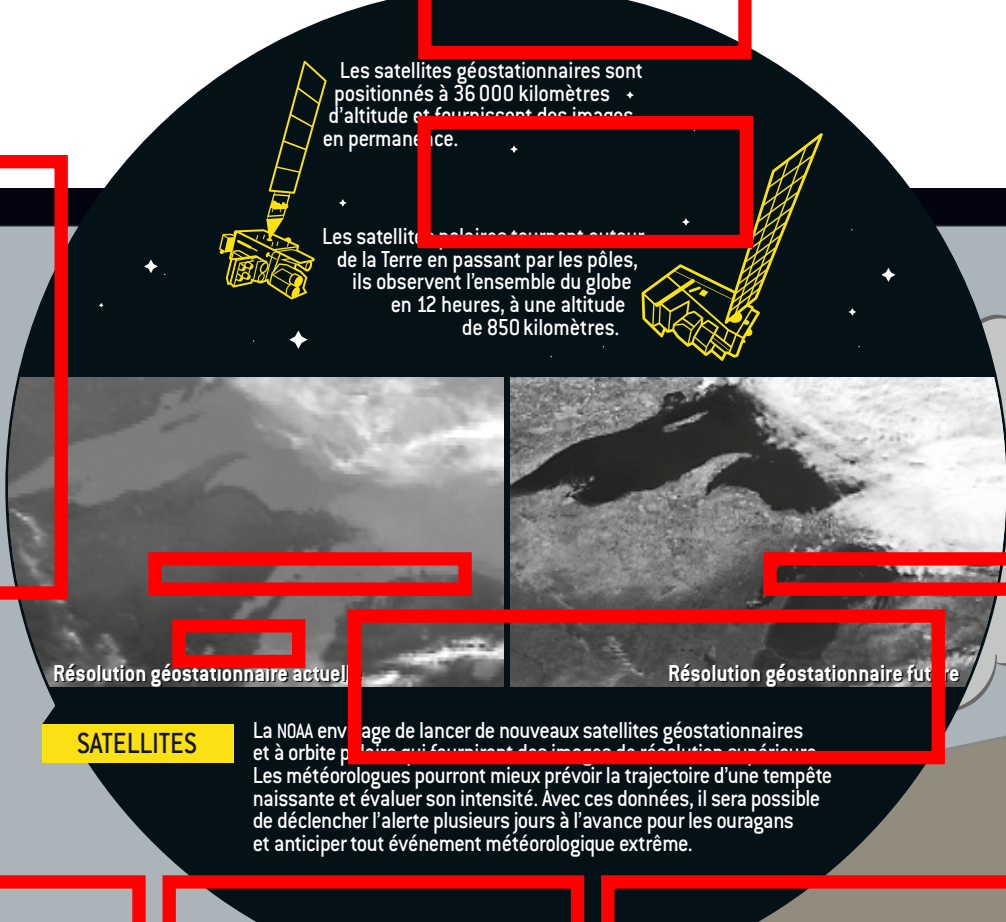
#### BIBLIOGRAPHIE

G.B. Fields et al. (éds.), *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. Rapport spécial IPCC, Cambridge University Press, à paraître.  
<http://www.ipcc-wg2.gov/SREX/>

R. Davies-Jones, *La naissance des tornades*, *Dossier Pour la Science*, vol. 51, avril-juin 2006.

La prévision des tempêtes a beaucoup progressé. Les prévisionnistes, par exemple, peuvent désormais lancer une alerte environ 14 minutes avant qu'une tornade ne se produise. L'Organisation américaine chargée de l'étude des océans et de l'atmosphère (NOAA) met au point de nouveaux systèmes de prévision. Le danger pourrait être sensiblement accru pour tous les types d'événements météorologiques extrêmes.

Avec l'aimable autorisation du NOAA (cartes)



Les radars ont une portée limitée : leurs ondes ne peuvent pas atteindre les régions au large des côtes, où les ouragans se forment et elles sont bloquées par les montagnes. Les prévisionnistes se servent dans ce cas de relevés effectués par satellites, qui complètent par une information globale les données locales des radars. Les satellites météorologiques de la NOAA fournissent plus de 90 pour cent des informations utilisées pour les prévisions quotidiennes ou à plus long terme. Leur rôle est déterminant lorsqu'il s'agit de lancer des bulletins d'alerte plusieurs jours à l'avance. Afin d'améliorer la collecte de ces renseignements, la NOAA va déployer toute une gamme de nouveaux satellites dans les cinq ans à venir.

En l'absence d'observations spatiales plus détaillées, on ne peut espérer élargir l'éventail des prévisions météorologiques et augmenter leur degré de précision, surtout en ce qui concerne des événements aussi extrêmes que les ouragans. Pour étudier les conditions météorologiques, il faut deux types de satellites : en orbite géostationnaire et polaire. Les satellites en orbite géostationnaire, situés à la verticale d'un point de l'équateur, à une altitude de 36 000 kilomètres, transmettent quasiment en continu des vues de la surface de la Terre. Ils réalisent des prises en boucle à 15 minutes d'inter-

prévisionnistes peuvent surveiller la croissance rapide des orages ou les modifications qui surviennent dans les ouragans (mais pas dans les tornades, car elles sont trop petites, avec un diamètre de quelques mètres à quelques centaines de mètres et leur durée de vie de quelques minutes à quelques dizaines de minutes est trop courte).

Les satellites polaires sont en orbite autour de la Terre en passant au-dessus des pôles à une altitude d'environ 850 kilomètres. Ils observent de façon rapprochée et plus détaillée la température et l'humidité de différentes couches de l'atmosphère. Un réseau mondial de ces satellites en orbite terrestre basse couvre l'ensemble du globe en 12 heures.

La NOAA projette de lancer une nouvelle série de satellites en orbite terrestre basse dans les dix ans à venir, dans le cadre du Système de satellites météorologiques polaires commun entre l'Europe et les États-Unis. Ces nouveaux dispositifs, équipés d'instruments plus perfectionnés, remplaceront les satellites vieillissants. Leurs données seront intégrées dans des modèles informatiques pour améliorer les prévisions météorologiques, y compris en ce qui concerne la trajectoire et l'intensité des ouragans, les orages violents et les grandes inondations. L'ensemble des capteurs micro-

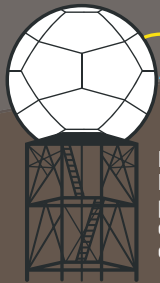
ondes et infrarouges transmettront des informations tridimensionnelles nettement plus précises sur la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère. Il sera possible d'observer les signes avant-coureurs d'un orage violent : les variations brutales de la température et du taux d'humidité, accompagnées d'une chute de la pression atmosphérique. Les capteurs infrarouges fournissent ce type de mesures dans des zones dépourvues de nuages. Les capteurs micro-ondes eux, peuvent « voir » à travers les nuages et prendre des mesures sur toute la surface de la Terre.

En avril 2011, cinq jours avant qu'un violent orage ne s'abatte sur six États du Sud des États-Unis, les données des satellites en orbite polaire et leur analyse par les modèles météorologiques conduisirent le Centre de prévisions nationales des ouragans de la NOAA à annoncer un risque de « déclenchement d'une tornade d'une puissance potentiellement historique ». Le Centre évalua que le danger était maximal à minuit juste avant l'orage. Ce niveau d'alerte est réservé aux cas les plus extrêmes, présentant un fort risque d'intempéries très violentes. Les nouveaux satellites en orbite terrestre basse devraient permettre de réaliser de telles prévisions cinq à sept jours à l'avance.

## AMÉLIORER LES PRÉVISIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Des courants ascendants d'air chaud et humide participent à la formation d'une tornade qui concentre de forts tourbillons de vents.

Un radar à double polarisation peut repérer une tornade même invisible pour l'œil humain.



Deux nouveaux types de radar devraient couvrir le déficit d'alerte. La technique de la double polarisation détecte les zones de fortes précipitations. Les radars tridimensionnels à balayage électronique explorent plus vite et de façon plus approfondie le ciel et détecteront les événements violents plus tôt.

### RADAR

Exemple de données fournies par un radar à double polarisation

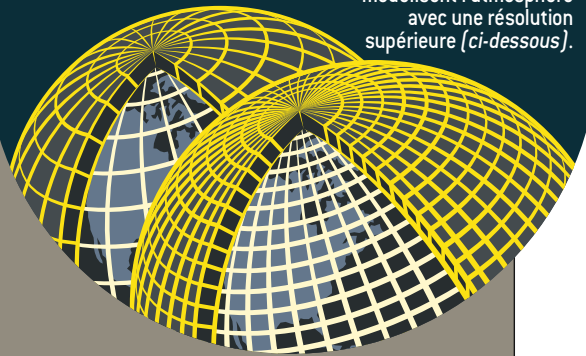
Zone de fortes précipitations

Les satellites géostationnaires font aussi l'objet d'améliorations. Des instruments de pointe, qui fourniront des images de la Terre dans les gammes visible et infrarouge seront embarqués sur les satellites GOES-R qui doivent être lancés en 2015. Les météorologues auront un meilleur suivi de l'intensification rapide des orages grâce à des images prises toutes les 5 minutes au lieu de 15 actuellement. Les satellites GOES-R seront aussi les premiers au monde à fournir des cartes des endroits où frappe la foudre sur le continent nord-américain. Le suivi des impacts de foudre aidera les prévisionnistes à détecter une augmentation du nombre des éclairs intenses et nuages-sol, augmentation liée à un orage qui gagne en intensité. Les travaux de recherche menés sur le sujet laissent penser que le nombre d'éclairs augmente dans les 20 minutes qui précèdent l'arrivée de la grêle, de vents violents ou même de tornades.

### SUPER-CALCULATEURS

Des ordinateurs plus puissants exploiteront les données des satellites et des radars sur des modèles plus performants. Les prévisionnistes pourront émettre des bulletins d'alerte avant le début des intempéries.

Les nouveaux ordinateurs modélisent l'atmosphère avec une résolution supérieure (ci-dessous).



Chacun de ces nouveaux systèmes de radars et de satellites améliorerait de quelques minutes les délais d'alerte, et même de beaucoup plus si l'on incorporait les données obtenues par tous ces dispositifs dans des modèles numériques. Les alertes à la tornade, par exemple, pourraient être émises jusqu'à une heure à l'avance. C'est ce type de délai qui aurait fait toute la différence à Joplin.

Les modèles de prévision sont fondés sur un ensemble de lois physiques régissant les écoulements atmosphériques, les réactions chimiques, etc. Ils assimilent des milliards de données sur les conditions météorologiques, telles que la température, la pression, le vent, afin de prévoir la situation future. Les modèles reposent sur un découpage de l'atmosphère en une grille tridimensionnelle depuis la surface de la Terre jusqu'en haut de la stratosphère, à 50 kilomètres d'altitude. À chaque cellule, on associe les données mesurées par les différents moyens d'observation et qui correspondent à des moyennes sur tout le volume de la cellule. Des programmes contenant des millions de lignes de code sont nécessaires pour gérer les milliards de cellules de la grille et estimer l'évolution des conditions météorologiques.

Un modèle de prévision classique utilise des grilles dont chaque élément couvre des carrés de 10 à 50 kilomètres de côté au sol. Plus la grille est dense, plus la résolution du modèle est élevée, et plus la simulation numérique sera performante dans la détection de modifications atmosphériques à petite échelle, susceptibles d'engendrer des orages. Traitement de données nécessite néanmoins des super-calculateurs plus rapides.

### Modéliser l'atmosphère

La modélisation est l'étape indispensable avant l'interprétation des résultats. Bill Lapenta dirige ces travaux d'interprétation dont découlent des prévisions à différentes échéances et jusqu'à plus de 72 heures à l'avance. Les équipes de la NOAA comparent leurs résultats avec ceux des autres centres internationaux pour définir les prévisions qui seront présentées dans les bulletins météorologiques des différents médias.

Les super-calculateurs de la NOAA à Fairmount en Virginie-Occidentale, peuvent effectuer 73 100 milliards d'opérations par seconde. Mais B. Lapenta pense que des vitesses plus grandes peuvent être atteintes, ce qui permettra de prendre en compte des grilles plus serrées.

## Des vents particulièrement dévastateurs

Il ne faut pas confondre tornades, tempêtes extratropicales et cyclones tropicaux (aussi nommés ouragans pour l'Amérique ou typhons pour l'Asie). Ces trois types de phénomènes peuvent être accompagnés de vents violents, mais les conditions de leur formation, la superficie touchée et la violence des éléments associés sont très différentes. Ainsi, les tempêtes et les cyclones tropicaux sont des phénomènes de grande échelle qui se déplacent sur des milliers de kilomètres et dont les effets dévastateurs touchent parfois plusieurs millions de kilomètres carrés : souvenons-nous par exemple de la tempête Xynthia qui, entre le 26 février et le 1<sup>er</sup> mars 2010, a traversé l'Europe du Portugal à la Scandinavie faisant 59 morts et près de deux milliards d'euros de dommages ; ou encore de Katrina, un ouragan qui, en août 2005, a traversé l'Amérique du Nord depuis la Floride jusqu'au Québec en laissant la Louisiane dévastée.

provoquant plus de 1 800 décès et des dommages estimés à plus de 60 milliards d'euros.

Au contraire, les tornades sont des phénomènes de petite dimension (rarement plus d'un kilomètre de diamètre horizontal) et de courte durée (quelques minutes à quelques dizaines de minutes), qui touchent des superficies de quelques kilomètres carrés. Mais ces systèmes peuvent atteindre une violence extrême avec des vitesses de vent, parfois supérieures à 400 ou 500 kilomètres par heure, qui peuvent rassembler les maisons même les plus solides et projeter à plus de 100 mètres des objets de la taille d'une automobile. Aux États-Unis, pays très touché par ce phénomène, on répertorie en moyenne chaque année entre 1 000 et 1 500 tornades dont une trentaine est mortelle et fait plus d'une centaine de blessés et de dégâts. En France, les tornades meurtrières sont très fréquentes, environ une tous les cinq ans.

En raison de leur petite taille et de leur courte durée de vie, les tornades échappent souvent à la surveillance

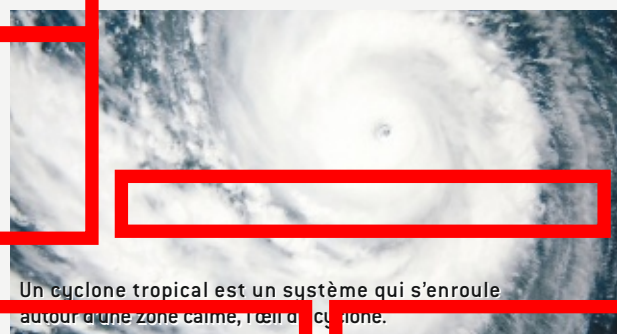
météorologiques, même les plus performants. Celles qui provoquent peu de dégâts passent inaperçues et ne

sont pas reportées. Il n'est pas non plus possible de prévoir leur lieu d'impact en extrapolant la trajectoire observée, comme on le fait par exemple pour les cyclones tropicaux, et l'échelle de la prévision qui pourrait être ainsi obtenue (au plus quelques minutes) est trop courte pour alerter la population. Pour les mêmes raisons, les tornades ne peuvent être représentées de façon explicite dans les modèles actuels de prévision du temps dont la résolution horizontale (maille de grille ou pixel) est rarement inférieure à dix kilomètres. Sans effet, la prévision fait appel à l'observation et à la prévision d'éléments précurseurs de plus grande dimension et d'indi-

cateurs de leur développement (instabilité verticale de l'atmosphère, rotation du vent, etc.).

Dans ce domaine, Météo-France a un atout de taille avec le modèle Arome, un modèle de prévision numérique particulièrement fin (2,5 kilomètres de résolution horizontale) et précis qui a été spécialement conçu pour détecter les conditions d'instabilité favorables au développement de phénomènes violents, ceux qui produisent les crues soudaines, les fortes chutes de grêle, les foudroissements ou les tornades.

**Jean-Pierre Chalon**  
Météo-France



Un cyclone tropical est un système qui s'enroule autour d'une zone calme, l'œil du cyclone.

© Shuttla - iStock/Valentin Gurrinkel

### ✓ SUR LE WEB

Service météorologique américain de la NOAA : <http://weather.gov>

Centre de prévision des orages violents de la NOAA : [www.spc.noaa.gov](http://www.spc.noaa.gov)

Carte de vigilance de Météo-France : [http://bit.ly/PLS417\\_vigilance](http://bit.ly/PLS417_vigilance)

Par exemple, avec une résolution d'environ 1,6 kilomètre, les modèles simuleront les conditions régnant à petite échelle qui transforment subitement un orage ou un ouragan classiques en un phénomène monstrueux. B. Lapenta prévoit que des simulations numériques à haute résolution pourraient commencer à voir le jour à partir de 2020. Il estime que dans les dix prochaines années, le potentiel toujours croissant des nouveaux radars et des nouveaux satellites sera associé à une nouvelle génération de modèles de prévisions météorologiques d'une extrême précision, fonctionnant en temps réel sur des ordinateurs dont la vitesse dépassera le milliard de milliards d'opérations par seconde. Cela nécessite de repenser la structure des systèmes de modélisation et du traitement informatique des données.

Si ces investissements considérables se réalisent, les prévisionnistes n'auront pas besoin d'attendre qu'une image radar détecte une tempête en train de se former pour déclencher

une alerte dans un délai de 14 à 18 minutes. À la place, ils seront en mesure de lancer un avertissement de tornade, de violence orange ou de crue subite en se fondant sur des prévisions élaborées par des modèles extrêmement précis et obtenues suffisamment à l'avance pour laisser aux habitants les 30 à 60 minutes qu'il leur faut pour se préparer.

Grâce à toutes ces améliorations, les météorologues seront en mesure de prévoir plus tôt et avec plus d'exactitude les aléas météorologiques qui sont susceptibles de paralyser une ville, comme une tempête de neige ou du verglas. Les prévisions pourront être établies cinq jours à l'avance pour des mauvaises conditions atmosphériques, et plus de sept jours avant un ouragan. La menace des crues de printemps dues à la fonte des neiges serait anticipée des semaines à l'avance. Cette perspective d'un pays qui aura assez de temps pour se préparer à résister à tous les scénarios est motivée par le désir d'éviter le fiasco constitué par les catastrophes de 2011.

# Futura-Sciences, le magazine de la découverte, de la science et de l'innovation



WWW.FUTURA-SCIENCES.COM



- **Actualités** : l'actu des sciences et des technologies analysée en continu.
- **Dossiers** : du réchauffement climatique à la grippe A, les enjeux clés en images avec plus de 800 dossiers.
- **Forums** : 50 forums thématiques pour poser toutes vos questions et échanger avec 300 000 membres.
- **Questions / réponses** : des réponses simples à des questions du quotidien.
- **Services** : fonds d'écran, cartes virtuelles, emploi, téléchargements, puzzles...

Retrouvez tous ces thèmes sur  
www.futura-sciences.com

Grippe A

Nutrition

Environnement

Jardinage



# Des GÈNES SAUTEURS dans le cerveau

Fred Gage et Aljsson Malm

Comment des vrais jumeaux, élevés de la même façon, peuvent-ils avoir des personnalités différentes ?

Des fragments d'ADN qui se déplacent dans le génome des neurones l'expliqueraient en partie.

## L'ESSENTIEL

- ✓ Les « gènes sauteurs » des copies de fragments d'ADN, s'insèrent en divers endroits du génome, ce qui peut modifier le fonctionnement des cellules.
- ✓ Les sauts de gènes sont fréquents dans l'organisme, surtout dans le cerveau ; des différences de comportement et de sensibilité aux maladies mentales en résulteraient.
- ✓ Un tel mécanisme, potentiellement délétère, aurait été conservé au cours de l'évolution, car il rend le cerveau plus adaptable.

Deux cerveaux humains paraissent identiques. Des différences apparaissent, de la cellule à l'architecture macroscopique : le cerveau humain contient 100 milliards de neurones, qui se déclinent en milliers de types distincts ; en outre, il existe plus de 100 000 milliards de connexions entre ces neurones. Ces différences favorisent la diversité de la pensée et des comportements, et influent sur la sensibilité aux maladies mentales.

D'où vient la diversité des réseaux de neurones et des fonctions cérébrales ? Elle résulte en partie de celle du patrimoine génétique. Les expériences vécues interviennent aussi, par exemple en influant sur l'intensité des connexions entre des ensembles particuliers de neurones. Pourtant, des vrais jumeaux, élevés par les mêmes parents, peuvent avoir des différences marquées de caractère, de comportement et de sensibilité aux maladies du cerveau. Ainsi, des souris génétiquement semblables, d'âge et de sexe identiques et traitées de la même façon en laboratoire, n'ont ni les mêmes capacités d'apprentissage ni les mêmes réactions d'évitement et de réponse au stress.

De nombreux facteurs différents de l'hérédité et de l'environnement sont donc à l'œuvre. Susceptibles d'intervenir à un stade précoce du développement embryonnaire ou plus tard au cours de la vie, ils modifient par exemple les gènes ou la production de protéines. Ainsi, lors de l'épissage alternatif, les ARN issus de la transcription d'un gène sont « taillés » de diverses façons, de sorte qu'un même gène peut coder deux protéines différentes, voire davantage. Les protéines effectuant la plupart des opérations dans les cellules, cela influe sur le fonctionnement des tissus. De nombreux chercheurs étudient également le rôle des modifications épigénétiques, qui changent l'activité des gènes (en augmentant ou en diminuant la quantité de protéines synthétisées) sans modifier le code génétique.

Au cours des dernières années, nous avons découvert, avec nos collègues, des suspects fascinants, qui semblent plus actifs dans le cerveau que dans d'autres tissus : des gènes sauteurs, aussi nommés éléments mobiles. Identifiés chez presque toutes les espèces, y compris chez l'homme, ces derniers sont capables de se dupliquer et de s'insérer dans diverses régions du

génomique. Ils peuvent ainsi changer le fonctionnement de la cellule, qui ne se comporte plus comme ses voisines. En grand nombre, ces sauts de gènes seraient susceptibles de modifier certains aspects du fonctionnement du cerveau.

Pourtant, le cerveau ne doit pas se dérégler. Dès lors, pourquoi l'évolution a-t-elle permis à un processus qui modifie sa programmation génétique de persister ? Bien que nous n'ayons pas de réponse à cette question, nous pensons qu'en créant de la variabilité dans les cellules cérébrales, les gènes sauteurs rendent les organismes plus flexibles et aptes à s'adapter plus

rapidement à un nouvel environnement. Ces gènes sauteurs auraient donc été conservés par l'évolution, car le bénéfice serait supérieur aux risques.

Si l'on sait depuis longtemps que des éléments mobiles se déplacent dans le génome, on découvre chaque jour un peu plus l'importance de leur activité dans le cerveau. Le saut de gènes a été découvert pour la première fois dans des plantes, avant même que James Watson et Francis Crick ne décrivent la structure en double hélice de l'ADN en 1953. Dans les années 1940, Barbara McClintock, du Laboratoire de Cold Spring Harbor, a observé

que des éléments contrôlant l'expression des gènes se déplaçaient d'un endroit à un autre dans le génome du maïs. Sous l'effet du stress, certaines régions du génome migraient et activaient ou inactivaient des gènes à proximité de leur nouvel emplacement. Lors de ses expériences, McClintock a produit des épis de maïs aux grains de couleurs différentes. Elle a ainsi créé des mosaïques génétiques, où les gènes étaient activés et inactivés de façon parfois différents d'une cellule à la cellule voisine.

## Une mosaïque génétique

Les recherches de McClintock, qui se sont d'abord heurtées au scepticisme de la communauté scientifique, lui ont valu le prix Nobel en 1983. Progressivement, il est devenu évident que le phénomène des mosaïques génétiques ne se limite pas aux plantes, mais concerne de nombreux organismes, y compris l'homme.

McClintock a étudié des transposons, des éléments mobiles qui se déplacent dans le génome de la cellule par un mécanisme de « couper-coller » : ils s'extraient de l'ADN environnant, puis s'insèrent en un nouvel endroit. Des recherches plus récentes sur les éléments mobiles du cerveau portent sur des rétrotransposons, qui agissent plutôt par copier-coller : ils se répliquent au lieu de s'extraire de l'ADN, et c'est la copie qui se déplace.

Les rétrotransposons représentent la moitié de l'ADN du génome humain. En comparaison, les quelque 25 000 gènes codant des protéines constituent moins de deux pour cent de notre ADN. Les gènes sauteurs sont des descendants des premiers systèmes moléculaires de réplication, qui ont envahi les génomes des eucaryotes (des organismes dont les cellules ont un noyau). On les a longtemps considérés comme de l'ADN non fonctionnel, mais en 1988, un groupe dirigé par Haig Kazazian, de l'Université de Pennsylvanie, a montré qu'ils étaient actifs chez l'homme.

En particulier, un type de rétrotransposon nommé LINE 1 ou L1 (pour *Long Interspersed Nuclear Element*, soit Long élément nucléaire disséminé) joue un rôle clé dans le génome humain. Il se déplace souvent, probablement parce que, contrairement à d'autres éléments mobiles, il code sa propre machinerie de copie. Il permet d'insérer des copies dans des



**1. CHAQUE CERVEAU EST UNIQUE,**  
à l'image de chaque empreinte digitale.

Jean-François Poirier

## LES AUTEURS



Fred GAGE est professeur à l'Institut Salk d'études biologiques, en Californie.

Alysson MUOTRI est professeur assistant à l'Université de Californie, à San Diego.

## LES ÉLÉMENTS L1 SE DÉPLACERAIENT DAVANTAGE DANS LE CERVEAU QUE DANS D'AUTRES ORGANES.

### BIBLIOGRAPHIE

J. K. Bailliet *et al.* Somatic retrotransposition alters the genetic landscape of the human brain, *Nature*, vol. 479, pp. 534-537, 2011.

A. Muotri *et al.* L1 retrotransposition in neurons is modulated by MeCP2, *Nature*, vol. 468, pp. 443-446, 2010.

T. Singer *et al.* LINE-1 Retrotransposons: Mediators of somatic variation in neuronal genomes?, *Trends in Neurosciences*, vol. 33, n° 8, 2010.

N. Coufal *et al.* L1 Retrotransposition in human neural progenitor cells, *Nature*, vol. 460, pp. 1127-1131, 2009.

endroits éloignés du génome cellulaire. L'élément L1 est d'abord transcrit en un brin d'ARN, qui passe du noyau dans le cytoplasme, où il sert de modèle pour la production de protéines. Celles-ci forment ensuite un complexe moléculaire avec l'ARN, puis l'ensemble retourne dans le noyau, à un nouvel emplacement.

Là, une de ces protéines, une enzyme nommée endonucléase, coupe l'ADN en des sites spécifiques. Elle utilise l'ARN comme modèle pour fabriquer une copie du double brin d'ADN du rétrotransposon L1. Enfin, elle insère cette copie dans le génome, à l'endroit d'une coupure. Une telle transcription inverse, d'ARN en ADN, n'est pas rare: le virus VIH, constitué d'ARN, se sert de ce mécanisme pour convertir son ARN en ADN, ce qui lui permet de s'intégrer de façon permanente dans le génome des cellules qu'il infecte.

La rétrotransposition échoue souvent en cours de route, produisant des copies tronquées de l'ADN d'origine. Quelles sont les conséquences de l'insertion d'un fragment ou d'une copie entière de l'élément L1? Parfois, il ne

se passe rien, parfois les effets sont positifs, parfois ils sont délétères. Dans certains cas, par exemple, des éléments mobiles s'insèrent dans la région codante d'un gène et la modifient. Une nouvelle protéine – potentiellement bénéfique ou nuisible – est codée par ce gène. L'insertion peut aussi arrêter la synthèse protéique. Dans d'autres cas, l'ADN s'insère dans une région non codante, mais agit comme un promoteur (un « interrupteur » activant les gènes proches): il modifie le degré d'expression du gène (la quantité de protéines produites à partir du gène). Là encore, les résultats peuvent être favorables ou non pour la cellule ou l'organisme.

Récemment encore, la plupart des chercheurs supposaient que la rétrotransposition d'éléments L1 survenait surtout dans les cellules germinales (à partir desquelles sont formés les ovules et les spermatozoïdes), au sein des ovaires et des testicules. On avait trouvé quelques indices suggérant qu'elle intervenait aussi dans les tissus somatiques (les tissus qui ne sont pas constitués de cellules germinales) pendant le développement embryonnaire, voire plus tard, mais ils avaient été réfutés. La localisation spécifique de la rétrotransposition dans les cellules germinales semblait

logique: si les gènes ont pour finalité de se propager, comme le prétend une théorie évolutionniste, le saut de gènes a peu de raisons de rester actif dans les cellules somatiques, puisqu'elles disparaissent en même temps que l'individu qui les porte.

## Les rétrotransposons sont très actifs dans le cerveau

Cependant, de meilleurs outils de détection ont permis de réfuter cette hypothèse. Ils ont révélé que les rétrotransposons se déplacent aussi dans le génome des tissus somatiques, même après le développement embryonnaire. Dans notre laboratoire de l'Institut Salk d'études biologiques, à La Jolla, en Californie, nous avons étudié les rétrotranspositions chez une souris. Ses cellules avaient été génétiquement modifiées pour émettre une fluorescence verte lorsqu'un élément L1 s'insérait dans le génome, quel que soit l'endroit dans l'organisme. Nous avons observé une fluorescence dans les cellules germinales, comme prévu, mais aussi dans certaines régions du cerveau, dont l'hippocampe (une région importante pour la mémoire et l'attention). Les éléments L1 se déplaceraient donc davantage dans le cerveau que dans d'autres tissus somatiques. Cela contredit un dogme ancien, selon lequel les codes génétiques des cellules cérébrales chez les adultes sont identiques et stables pendant toute la vie des cellules.

On a constaté que les rétrotranspositions surviennent dans les cellules dites progénitrices: de telles cellules sont en attente, prêtes à se diviser et à engendrer des cellules spécialisées (ici de nouveaux neurones hippocampiques); leur division est déclenchée par un signal d'activation émis par exemple après la mort de certaines cellules – qui sont alors remplacées. De nombreux tissus abritent des populations de cellules progénitrices. L'hippocampe est l'une des régions du cerveau où siège une neurogenèse (la production de nouveaux neurones). Ainsi, les éléments L1 seraient actifs lorsque des neurones naissent, soit à un stade précoce du développement, soit dans les quelques régions du cerveau où la neurogenèse persiste à l'âge adulte.

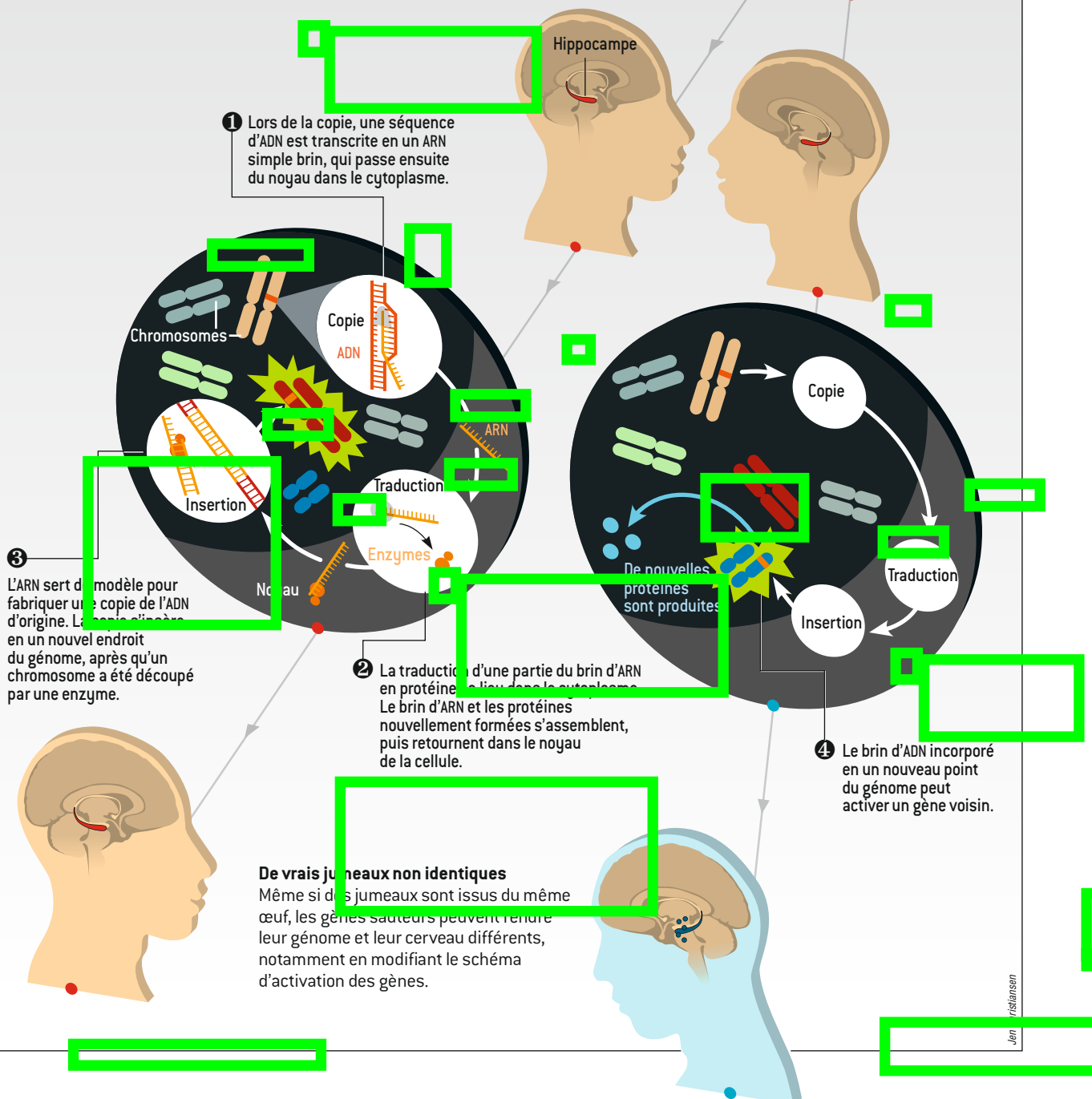
Pour confirmer que les rétrotransposons sont plus actifs dans le cerveau

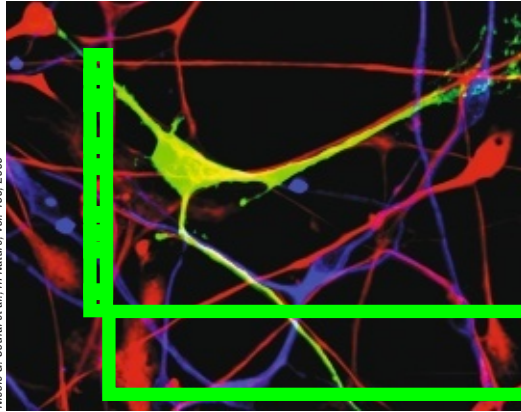
## UN COPIER-COLLER GÉNÉTIQUE

Des séquences d'ADN nommées gènes sauteurs ou rétrotransposons se dupliquent, puis les copies sont insérées en divers endroits du génome. Les rétrotransposons n'ont parfois aucun effet sur la synthèse de protéines. Dans certains cas, ils la modifient et influent sur le fonctionnement des cellules. Les rétrotransposons représentent la moitié de l'ADN dans le génome humain. Les sauts de gènes se produisent dans les autres organes.

### Des moteurs de la variabilité génétique

Des différences non héréditaires apparaissent dans le code génétique lorsque des fragments d'ADN « sautent » au hasard d'un endroit à l'autre du génome. Ces éléments mobiles peuvent se déplacer tant dans le cerveau de l'embryon que dans celui de l'adulte. Le mécanisme est représenté ici pour deux vrais jumeaux.





Nicole G. Coufal et al., in Nature, vol. 460, 2009

**2. CE NEURONE (en vert) a été modifié génétiquement pour produire des protéines fluorescentes lorsque des gènes sauteurs se déplacent dans son génome.**

qu'ailleurs nous avons effectué des analyses *post mortem* chez l'homme. Nous avons compté le nombre d'éléments L1 présents dans les noyaux cellulaires des tissus cérébral, cardiaque et musculaire, et constaté qu'il était beaucoup plus élevé dans le tissu cérébral que dans les deux autres.

## Des sauts de gènes par milliers

La plupart des rétrotranspositions ont dû se dérouler lors du développement du cerveau. En effet, la rétrotransposition semble nécessiter des divisions cellulaires – on ne l'a jamais observée dans des cellules qui ne se divisent pas. Or dans le cerveau, les divisions s'arrêtent après la petite enfance, sauf dans les régions progénitrices. Selon une étude réalisée notamment par Nicole Coufal, de notre laboratoire, chaque neurone humain connaîtrait en moyenne 80 intégrations d'éléments L1. Une telle fréquence entraîne une grande variabilité entre cellules chez une même personne et entre individus.

L'activité des éléments L1 dans le cerveau humain a été confirmée en 2011 par Kenneth Baillie, de l'Institut Roslin, près d'Édimbourg, en Écosse, et ses collègues. Les chercheurs ont identifié 7743 insertions d'éléments L1 dans l'hippocampe et le noyau caudé (une zone intervenant également dans la mémoire) chez trois personnes décédées.

Lors de son étude, l'équipe de l'Institut Roslin a fait une découverte inattendue : elle a trouvé environ 15000 exemplaires d'une autre classe de rétrotransposons, les SINE (pour *Short Interspersed Nuclear Elements*, ou élément nucléaire court et disséminé). Le SINE le plus abondant, membre d'une famille nommée *Alu*, n'avait jamais été observé dans le cerveau.

Nous nous sommes alors demandé ce qui déclenche l'activité des éléments L1. Comme la neurogenèse se déroule notamment dans l'hippocampe et l'activité est stimulée par l'exercice physique, ce dernier est-il l'élément déclencheur des rétrotranspo-

sitions ? Pour le savoir, nous avons fait courir nos souris transgéniques dans une roue : le nombre de cellules fluorescentes vertes a presque doublé dans leur hippocampe.

Les nouvelles situations et les défis stimulant aussi la neurogenèse, constituent-ils d'autres facteurs déclenchant la rétrotransposition ? Si les sauts d'éléments L1 augmentent lorsque le système nerveux apprend et s'adapte au monde extérieur, cela signifie que le cerveau est en constante évolution génétique et change à chaque nouvelle expérience. Des différences notables pourraient en résulter, même entre des vrais jumeaux.

Pour tester l'hypothèse que les gènes sauteurs contribuent à la diversité cérébrale chez l'homme, nous ne nous sommes pas contentés de compter les éléments L1 dans l'ADN. Nous avons aussi cherché un lien entre nos résultats et des événements visibles, tels que des maladies mentales. Les conséquences délétères sont plus faciles à mettre en évidence que les effets positifs.

En 2010, nous avons montré qu'une mutation d'un gène nommé *MeCP2* modifiait la rétrotransposition des éléments L1 dans le cerveau. Or des mutations de ce gène sont à l'origine de plusieurs maladies du cerveau, dont le syndrome de Rett, un trouble grave du développement cérébral qui touche presque exclusivement les filles. Il nous reste à comprendre les mécanismes moléculaires et cellulaires de ces troubles. Chez les souris et les êtres humains atteints du syndrome de Rett, la mutation du gène *MeCP2* que nous avons identifiée entraîne la multiplication des insertions de L1 dans les neurones. Les gènes sauteurs seraient-ils responsables de certains des symptômes du syndrome de Rett ?

## Un rôle dans la schizophrénie et l'autisme ?

L'activité des éléments L1 est aussi élevée dans d'autres maladies cérébrales. Une analyse du cortex frontal chez des sujets atteints de schizophrénie a révélé une augmentation du nombre de séquences L1 par rapport à des personnes indemnes. On pense également que les éléments L1 interviennent dans des troubles tels que l'autisme. La compréhension du rôle que jouent les éléments mobiles dans les maladies psychiques conduira peut-être à de nouvelles méthodes de diagnostic, de traitement et de prévention.

Les études sur les gènes sauteurs dans le cerveau pourraient stimuler divers champs de recherche. Les généticiens du comportement suivent souvent des groupes de jumeaux identiques sur de longues périodes pour étudier les effets des gènes et déterminer les contributions de l'environnement à des troubles tels que la schizophrénie. Les gènes sauteurs remodelant le génome après la

période de développement embryonnaire, les vrais jumeaux ne sont pas aussi génétiquement semblables qu'on l'admettait jusqu'à présent. Ce résultat complique alors la tâche consistant à démêler la part de l'inné et de l'acquis.

Une question subsiste : pourquoi l'évolution n'a-t-elle pas détruit ces vestiges d'anciens virus, qui risquent d'introduire des défauts génétiques fatals dans nos cellules ? L'être humain a toujours subi les attaques de parasites viraux et d'autres envahisseurs, qui ont intégré leur génome dans celui de l'individu attaqué. Nos ancêtres n'ont pas été capables d'éliminer totalement ces intrus, mais ils se sont adaptés pour coexister avec eux : ils les ont rendus silencieux grâce à différents mécanismes qui les ont fait muter et les ont désactivés. Dans certains cas, l'insertion de nouveaux éléments a été bénéfique. C'est l'une des raisons pour lesquelles les cellules permettent parfois, voire encouragent, le saut d'éléments L1 à l'intérieur du génome, dans des conditions soigneusement contrôlées.

Nous en apprendrons peut-être plus en analysant pourquoi la réponse au stress de souris génétiquement identiques et élevées dans les mêmes conditions varie à ce point. Les différences de comportement observées présentent une distribution caractéristique dans la population, dessinant une courbe en forme de cloche. Cela suggère que les mécanismes à l'origine de cette variabilité sont aléatoires, comme semblent l'être les sites d'insertion des rétrotransposons L1.

La nature aléatoire présumée des déplacements des éléments L1 dans le génome évoque un mécanisme de sélection naturelle, où les bénéfices des insertions utiles sont supérieurs aux conséquences délétères des autres. En jetant souvent les dés dans les cellules neurales progénitrices de l'hippocampe, la nature optimise la possibilité qu'émerge une population de neurones adaptés aux tâches auxquelles le cerveau est confronté. Un processus voisin a lieu lorsque l'ADN des cellules immunitaires se réarrange, les conduisant à produire de nouvelles gammes d'anticorps. Les mieux adaptées à la lutte contre un agent pathogène sont ensuite sélectionnées.

Les effets des insertions n'ont pas besoin d'être importants ni de concerner un grand nombre de cellules pour influencer le comportement. Chez les rongeurs, un changement dans les modalités d'activation d'un seul neurone suffirait à faire apparaître une différence.

L'idée d'insertions utiles est étayée par la découverte que la seule sous-famille d'éléments sauteurs L1 active dans le génome humain est apparue il y a environ 2,7 millions d'années, à une époque où nos ancêtres ont adopté des outils en pierre. Les éléments L1 pourraient donc avoir contribué à la construction de cerveaux inventifs, susceptibles de s'adapter à des conditions environnementales et climatiques changeantes. Ainsi, les rétrotransposons L1 auraient bien participé à l'évolution de *Homo sapiens*.



**Muséum national d'Histoire naturelle**

**Écologie acoustique**



**des chiroptères d'Europe**

**Identification des espèces, études de leurs habitats et comportements de chasse**

Michel Barataud

Animaux nocturnes, les chiroptères ont développé un système de repérage dans l'espace du type sonar. Inaudibles à l'oreille humaine, les cris des chauves-souris peuvent être perçus, enregistrés et analysés grâce à différents appareils et logiciels.

Cet ouvrage dresse le bilan des connaissances acquises par l'auteur depuis plus de vingt ans en matière de détection ultrasonore. Aux premières approches, purement auditives, il ajoute une autre dimension : l'identification par l'analyse informatique des ultrasons. Grâce aux détecteurs de plus en plus performants et à l'analyse informatique, la méthode décrite permet d'identifier en Europe environ 85 % des contacts acoustiques, de mener des inventaires et d'entreprendre des études toujours plus fines sans perturber les animaux. Ce livre traite 33 des 42 espèces de chauves-souris européennes.

**DVD en supplément**

Vous y trouverez les échantillons sonores illustrant la méthode ainsi que les fichiers (graphiques) nécessaires à l'identification des espèces.



ISBN : 978-2-85653-685-8  
format 170 x 245 mm • impression quadri  
nombreuses photos • DVD • 344 p. • 49,90 € TTC

**ouvrage en vente dans la librairie des Publications Scientifiques face à la Grande Galerie de l'Évolution**

**PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM**

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

# La sélection de livres

## ■ POUR LA SCIENCE

Profitez de l'été pour vous adonner à la science ! Au programme, des lectures insolites et variées : l'univers des sportifs, les produits de beauté, des expériences à réaliser au dîner, des œuvres d'art analysées par un scientifique.

### Sportifs high tech

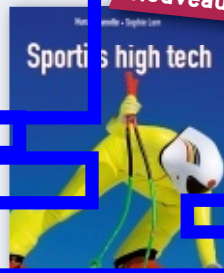
Nunzio Lanotte et Sophie Lemarié

Dans cet ouvrage, les auteurs brossent un tableau exhaustif des technologies innovantes mises au service du sport et des sportifs de haut niveau. Le lecteur est entraîné dans les centres spécialisés et les laboratoires où les sportifs et leurs entraîneurs travaillent pour préparer la victoire...

Éditions Belin/Pour la Science 2012

160 pages – 23 euros – ISBN 978-2-7011-5966-9

Nouveauté



Réf. 005966\*

### 50 expériences pour épater vos amis à table

Jack Guichard et Guy Simonin

Photos de Josselin Guichard avec la collaboration de Kamil Fadel

Vous allez surprendre vos amis avec ces expériences étonnantes : retournez votre verre rempli sans en perdre une goutte, transformez l'eau en vin, créez un nuage dans une bouteille, mettez une olive en lévitation ! Des expériences très faciles à réaliser et enrichies d'un complément scientifique et compréhensible des phénomènes scientifiques en jeu.

Éditions Le Pommier 2011

168 pages – 18,90 euros – ISBN 978-2-7465-0544-5



Réf. 090544\*

### Trucs et recettes de beauté

Ce que dit la science

Sous la direction de Doriana Rodino

Les produits naturels de beauté sont à la mode, mais ont-ils une réelle efficacité ? Le livre évoque leur usage au cours de l'histoire, décrit les ingrédients utilisés, explique leurs propriétés et distingue les effets avérés de ceux sujets à caution, voire farfelus.

Éditions Belin/Pour la Science 2012

224 pages – 18 euros – ISBN 978-2-8424-5693-4

Nouveauté



Réf. 005693\*

### Comment la vie a commencé

Alexandre Meinesz



Réf. 005911\*

D'où vient la vie ? Comment est-elle apparue sur Terre ? Cette nouvelle édition tient compte de la découverte en 2010, au Gabon, de fossiles suggérant l'existence d'une vie organisée et complexe il y a plus de 2,1 milliards d'années. Une découverte qui déplace le curseur de 1,5 milliard d'années et remet en cause nos connaissances actuelles sur l'apparition de la vie.

Éditions Belin/Pour la Science 2011

432 pages – 19,30 euros – ISBN 978-2-7011-5911-9

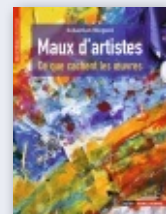
### Maux d'artistes

Sebastian Dieguez

Existe-t-il des liens cachés entre une œuvre d'art – une peinture, une sculpture, une composition musicale ou une œuvre littéraire – et une maladie de l'esprit que présentait son auteur ? Examinant divers chefs-d'œuvre avec un regard de neuropsychologue, Sebastian Dieguez analyse plus d'une vingtaine d'œuvres de Dostoevski, Monet, De Chirico, Proust, Van Gogh, etc.

Éditions Belin/Pour la Science 2010

176 pages – 25,40 euros – ISBN 978-2-8424-5101-1



Réf. 075101

En partenariat  
avec les éditeurs



Tous ces livres sont  
également disponibles  
en librairie.



## HISTOIRE DES SCIENCES

## Poincaré et la rotation de la Terre

À l'aube du XX<sup>e</sup> siècle, Henri Poincaré se trouva malgré lui au cœur d'une polémique sur la rotation de la Terre. La presse s'empara de l'affaire....

Jean-Marie GIGNOUX et Christian GERIN

Jusqu'à sa mort, le mathématicien et physicien Henri Poincaré (1854-1912) a été cité, commenté, décrit, encensé ou critiqué dans la presse généraliste de toutes tendances (*Le Matin*, *Le Temps*, *Le Petit Parisien*, *La Presse*, *Le Figaro*, *La Croix*, *L'Humanité*, etc.). Il y a également apporté ses propres contributions, touchant un large public sur des sujets qui lui tenaient à cœur, ou se défendant d'attaques et de récupérations dont il faisait l'objet. À la lecture de ces articles, un autre Poincaré apparaît : le savant tel qu'il était perçu dans l'espace public de son vivant, le référent répondant à des questions scientifiques ou non, l'homme blessé se défendant face à de fausses interprétations de son œuvre, l'homme engagé, aussi, par exemple sur des questions d'éducation et de programmes scolaires. Parmi les événements les plus marquants de sa vie, il en est un qui a fait couler beaucoup d'encre dans la presse : une longue polémique sur la rotation de la Terre.

## Une polémique naît

Cette polémique ne prit pas naissance dans le milieu scientifique, mais dans le milieu philosophique au sein duquel Poincaré s'était imposé en parallèle de son parcours scientifique. Tout commença pendant l'Exposition universelle de Paris, début août 1900. Alors que s'étaient sous les yeux d'un public ébahi les progrès de la science et de la technique, se tenait le Congrès international de philosophie organisé par le philosophe Émile Boutroux, beau-frère de Poincaré. Ce dernier était invité à y présenter ses idées sur les principes de la philosophie des sciences. Rien d'éton-

nant à cela, après dix années où il avait marqué l'astronomie en remportant le Grand prix du roi de Suède et de Norvège sur le problème des trois corps en 1889 et publié ensuite les trois volumes des *Méthodes nouvelles de la mécanique céleste*.

Dans son exposé, il remettait en cause l'existence d'un espace absolu : « Il n'y a pas d'espace absolu et nous ne concevons que des mouvements relatifs ; cependant on énonce le plus souvent les faits mécaniques comme s'il y avait un espace absolu auquel on pourrait les rapporter. » Puis, il ajoutait :



1. CONTRAIRE que l'on ait mal interprété ses propos sur la rotation de la terre, Poincaré, ici photographié au début du XX<sup>e</sup> siècle, dédia son portrait de la phrase attribuée à Galilée : « E pur si muove » (Et pourtant elle tourne). Voila qui renverse tout nos idées.

« Cela n'empêche pas que l'espace absolu, c'est-à-dire le repère auquel il faudrait rapporter la Terre pour savoir si réellement elle tourne, n'a aucune existence objective. Dès lors cette affirmation : "la Terre tourne" n'a aucun sens, puisqu'aucune expérience ne permettrait de la vérifier ; puisqu'une telle expérience ne pourrait être ni réalisée, ni rêvée par le Jules Verne le plus hardi, mais ne peut être conçue sans contradiction ; ou plutôt ces deux propositions : "la Terre tourne" et : "il est plus commode de supposer que la Terre tourne", ont un seul et même sens ; il n'y a rien de plus dans l'une que dans l'autre. »

Cette dernière phrase engendra vite des polémiques entre spécialistes au sein des réunions de la Société philosophique de France créées quelques mois après le congrès de Paris : elles impliquèrent Poincaré lui-même, bien sûr, et face à lui le philosophe Édouard Le Roy, mais aussi le mathématicien Georges Lechalas et d'autres savants qui refusaient de rejeter le principe newtonien de l'existence d'un référentiel absolu.

La presse généraliste n'en fit pas un écho précis. Tout au plus y découvre-t-on des articles contradictoires, tel celui paru dans le *Journal des débats politiques et littéraires* du 10 novembre 1900 : « M. Poincaré a soutenu sur les vérités scientifiques une thèse fort originale. Les vérités scientifiques ne seraient pas vraies dans l'ancien sens du mot, en ce sens qu'elles se conformeraient à une nature des choses telles sont de simples arrangements conventionnels, que l'esprit préfère à d'autres, pour de simples raisons de commodité. Que la terre tourne autour du soleil, cette thèse n'est pas plus vraie que la thèse inverse ; elle est seulement plus commode et plus simple. Voilà qui renverse tout nos idées.

En 1902 et 1903, plusieurs événements indépendants portèrent cette polémique dans l'espace public. Le premier fut la réédition très médiatisée, en 1902, de l'expérience du pendule de Foucault au Panthéon et le deuxième, la publication concomitante de *La science et l'hypothèse*, le premier (et le plus connu) des trois ouvrages de philosophie des sciences que Poincaré publia de son vivant. Le dernier événement est la condamnation en 1903, par l'Église de l'abbé Alfred Loisy (1857-1940).

## La réinstallation du pendule de Foucault

Le 14 juin 1902, le journal *Le Temps* annonçait la réinstallation du pendule de Foucault au Panthéon, à l'initiative de Poincaré et de l'astronome Camille Flammarion. L'inauguration eut lieu le 22 octobre 1902 en présence de M. Chaumié, ministre de l'Instruction publique. Trois jours plus tard, le quotidien *La Croix* proposa, dans une rubrique intitulée *Causerie scientifique*, une explication détaillée de l'expérience ainsi qu'une illustration (voir la figure 4).

Le chroniqueur scientifique, Somsoc, commençait ainsi son article : « Sous l'action de la pesanteur, le pendule, écarté de la verticale, y revendra par une série d'oscillations successives s'effectuant dans un plan fixe, puisqu'aucune force n'agit pour changer ce plan, et comme la terre tourne au dessous du pendule, le plan d'oscillation de ce dernier paraîtrait tourner relativement à la terre en sens contraire de la rotation, c'est-à-dire dans le même sens que la sphère céleste et cela en 24 heures. En visant une étoile située dans le plan d'oscillation, le pendule ne la quittera donc pas, tant que durera l'expérience [...] Le plan d'oscillation n'est pas un objet matériel... Il appartient à l'espace, l'espace absolu. »

Débuta alors la seconde polémique entre spécialistes. Ceux qui pensaient que l'expérience de Foucault ne prouvait rien s'en prirent à Flammarion. L'étincelle qui remit le feu aux poudres fut un article anonyme signé d'« un polytechnicien sceptique ». Paru dans *L'Illustration* du 29 novembre 1902, il fut reproduit début 1903 dans le *Bulletin de la Société astronomique de France* avec une réponse de Flammarion. Une question était au cœur

## LA TERRE TOURNE-T-ELLE ?

Réponse à des allégations hasardeuses —  
Une lettre de M. Poincaré au secrétaire  
général de la Société astronomique  
de France.

Nous avons eu l'occasion de faire remarquer combien il était étrange que l'on prêtât à M. Poincaré des doutes sur le « mouvement de rotation » de la Terre, alors que ce savant est précisément de ceux dont les travaux ont le mieux prouvé ce mouvement. Le dernier bulletin de la Société astronomique de France contient, à ce sujet, une lettre que M. Poincaré vient d'adresser à M. Flammarion, et que voici :

2. QUATRE ANS APRÈS AVOIR EXPOSÉ SES RÉFLEXIONS PHILOSOPHIQUES sur la rotation de la terre, Poincaré s'exprima à nouveau sur le sujet en envoyant une lettre à Flammarion, que le journal *Le Matin* reproduisit le 7 mai 1904 (ci-dessus). Il espérait ainsi mettre fin aux multiples détournements et récupérations dont il avait fait l'objet.

de la discussion : des étoiles suffisamment éloignées pour sembler immobiles, telles l'Étoile polaire ou Bêta du Centaure, étaient-elles immobiles de façon absolue ou relative ?

Peu après la réinstallation du pendule au Panthéon, *La science et l'hypothèse* fut présenté à l'Académie des sciences et à la Société astronomique de France. Dans un chapitre intitulé *Le mouvement relatif et le mouvement absolu*, écrit à partir de son intervention au congrès de 1900, Poincaré, reprenant sa phrase sur la Terre qui tourne, réaffirmait la non-existence d'un espace absolu.

Pour certains, Poincaré se contredisait, puisqu'il participait à une expérience visant à prouver la rotation de la Terre tout en publiant un texte où il affirmait que rien ne permettait d'être assuré en l'absence de référentiel absolu. D'autant que son texte prêtait à confusion, semblant tout à la fois accepter les effets de la rotation de la Terre autour de son axe et se demander si cette rotation a un sens : « Si le ciel était sans cesse couvert de nuages, si nous n'avions aucun moyen

d'observer les astres, nous pourrions, néanmoins, conclure que la terre tourne ; nous en serions avertis par son aplatissement, ou bien encore par l'expérience du pendule de Foucault. Et pourtant, dans ce cas, dire que la terre tourne, cela aurait-il un sens ? S'il n'y a pas d'espace absolu, peut-on tourner sans tourner par rapport à quelque chose et d'autre part comment pourrions-nous admettre la conclusion de Newton et croire à l'espace absolu ? »

La question occupa donc les spécialistes et, même si les débats étaient vifs, ils portaient sur des problèmes classiques liés à la philosophie des sciences : la place des conventions, la validité et la « commodité » des modèles retenus, la question de la preuve empirique etc. Mais c'était sans compter sur le contexte idéologique et politique de l'époque, en particulier sur le débat concernant la séparation de l'Église et de l'État, et celui sur l'instruction publique ou privée.

Dans ce cadre, l'affaire Dreyfus, une autre affaire

engendrant une vive controverse entre catholiques et laïques début janvier 1904. L'abbé Loisy, théologien exégète de l'Église, avait publié en 1902 un ouvrage intitulé *L'Évangile et l'Église* dans lequel son approche historique et philologique des textes de la Bible remettait en cause un certain nombre de dogmes de l'Église. La condamnation de cet ouvrage par décret du Saint-Office en décembre 1903 suscita l'émotion, l'anathème, l'envenimé du débat, qui se transforma vite en une opposition entre l'Église et la science.

## La presse s'emballe

Alors que le *Matin* du 28 décembre 1903 consacra sa une à la mise à l'index de l'ouvrage de l'abbé Loisy et aux raisons de sa condamnation, un entrefilet intitulé *Propos d'un Parisien*, rédigé par le journaliste d'opinion Henri Harduin, relança la polémique sur la rotation de la Terre et la porta dans un camp idéologique que Poincaré n'avait pas anticipé. Ce chroniqueur utilisait la condamnation de Loisy pour mettre en lumière l'immobilisme de l'Église, opposé à la perpétuelle et saine remise en question de la science par elle-même (voir la figure 3a). L'article produisit une réaction en chaîne dans la presse. Tout d'abord dans La

*Libre Parole* du 9 janvier 1904, où le fondateur de ce journal politique antisémite Édouard Drumont, répondit à Harduin en ces termes, convoquant fort peu à propos Poincaré et ses écrits :

« Des journalistes en quête d'un thème pour une chronique, comme notre confrère Harduin qui a pris la tâche d'amuser les lecteurs du *Matin*, ne perdent pas cette occasion de faire solennellement la leçon à l'Église ; ils sortent immédiatement Galilée : « Vous voyez, s'écrit M. Harduin, quel contraste entre la science et l'Église ! L'Église condamne Galilée ; la science dès qu'un fait nouveau lui est démontré, s'incline et reconnaît ses erreurs passées. »

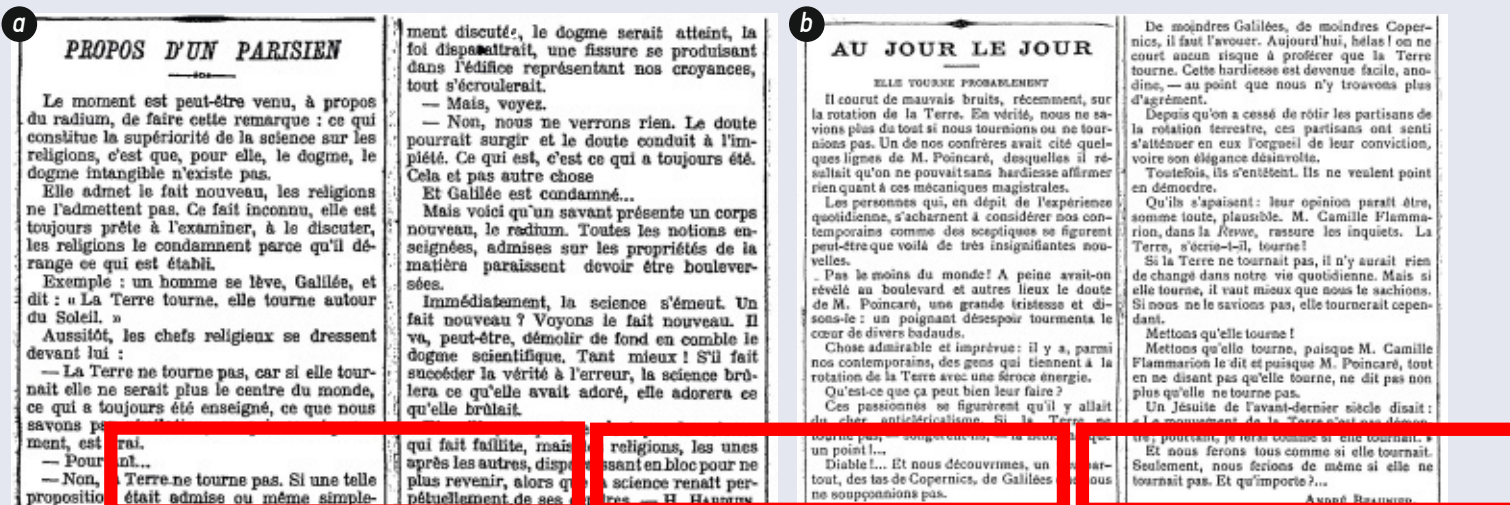
L'argument aurait quelque valeur si la science était arrivée à une certitude quelconque ; mais qu'en réalité, elle en est toujours aux conjectures et aux hypothèses. Il n'est pas démontré du tout que la Terre tourne, comme le prétendait Galilée, et qu'elle ne soit pas le centre du système planétaire. M. Harduin, qui n'est pas plus savant que moi, affirme impertinemment que la terre tourne ; mais M. Poincaré, qui est, à l'heure actuelle, le premier des géomètres-physiciens français

et qui est probablement plus instruit que M. Harduin et que moi, n'a nullement cette affirmation qui est celui des demi-ignorants »

Il est important ici de souligner la confusion et la désorientation que présente dans les esprits : on mélange la rotation diurne de la Terre autour de son axe, la révolution annuelle autour du Soleil, le pendule de Foucault, le procès de Galilée. Mais nulle mention, par exemple, des expériences d'interférométrie menées de 1881 à 1887 par Albert Michelson et Edward Morley qui n'avaient pas permis de démontrer le mouvement relatif de la Terre par rapport à l'éther, ce fluide hypothétique emplissant l'espace, le support de la propagation de la lumière et considéré comme un repère absolu.

La réponse de Drumont incita un journaliste du *Ligaro* à amplifier la polémique dans un article publié le 2 février 1904 et intitulé *Tournez-vous ?* : « C'est un problème qui n'a peut-être pas beaucoup d'actualité ; mais enfin nous voudrions bien savoir à quoi nous en tenir. » Dès lors, cette remise en cause de la rotation du globe déclencha les chroniqueurs, tel André Beaunier qui la reprit dans le *Journal des débats politiques et littéraires* du 23 mars 1904 (voir la figure 3b). Le lendemain, le chroniqueur scientifique François Peudefer s'attaqua un long article intitulé *La Terre tourne-t-elle ?* dans lequel il rappelait au grand

public toutes les preuves tangibles de la rotation diurne de la Terre tout en faisant l'histoire de la polémique. Une semaine plus tard,



3. UN ARTICLE DU CHRONIQUEUR Henri Harduin dans le *Le Matin* du 28 décembre 1903 mit le feu aux poudres (a). Il dénonçait l'immobilisme de l'Église en la comparant aux sciences. On lui rétorqua, en invoquant Poincaré, que la science n'aboutit à aucune certitude, puisque même elle pourrait ne pas tourner. Alors, la Terre tourne-t-elle ? La question devint même idéologique, comme le souligna avec humour un chroniqueur du *Journal des débats politiques et littéraires* le 23 mars 1904 (b).

Le Petit Parisien proposait sous le même titre un article de Jean Frolo dans lequel Poincaré se trouvait de nouveau impliqué.

## Poincaré agacé, mais peu convaincant

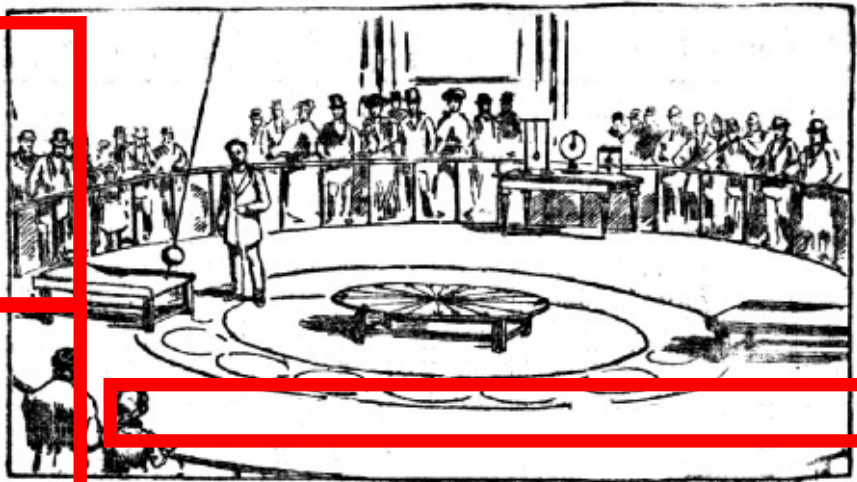
Poincaré intervint alors. Il rédigea une lettre ouverte adressée à Flammarion intitulée *La Terre tourne-t-elle ?*, publiée dans le *Bulletin de la Société astronomique de France* de mai 1904 et reproduite dans le journal *Le Matin* du 7 mai 1904 :

« Je commence à être un peu agacé de tout le bruit qu'une partie de la presse fait autour de quelques phrases tirées d'un de mes ouvrages – et des opinions ridicules qu'elle me prête. Les articles auxquels ces phrases sont empruntées ont paru dans une revue de métaphysique [...]. Je parlais le langage de la métaphysique moderne. Dans le même langage, on dit couramment "Les deux phrases *le monde extérieur existe*, et *il est commode de supposer que le monde extérieur existe*" n'ont qu'un seul et même sens."

La rotation de la Terre est donc certaine, précisément dans la même mesure que l'existence des objets extérieurs. Je pense qu'il y a là de quoi rassurer ceux qui auraient pu être effrayés par un langage inaccoutumé. Quant aux conséquences qu'on a voulu en tirer, il est inutile de montrer combien elles sont absurdes. Ce que j'ai dit ne saurait justifier les persécutions exercées contre Galilée, d'abord parce qu'on ne doit jamais persécuter même erreur, ensuite parce que même au point de vue métaphysique, il n'est pas faux que la Terre tourne, de sorte que Galilée n'a pu commettre d'erreur.

Cela ne voudrait pas dire non plus qu'on peut enseigner impunément que la Terre ne tourne pas, quand cela ne serait que parce que la croyance à cette rotation est un instrument aussi indispensable à celui qui veut penser sagement, que l'est le chemin de fer, par exemple, à celui qui veut voyager vite.

Quant aux preuves de cette rotation, elles sont trop connues pour que j'insiste. Si la Terre ne tournerait pas sur elle-même, il faudrait admettre que les étoiles décrivent, en 24 heures, une circonférence immense, que la lumière mettrait des siècles à parcourir.



4. L'EXPERIENCE DU PENDULE DE FOUCAULT, réinstallée au Panthéon à l'initiative de Poincaré et de Flammarion, démontre que la Terre tourne (illustration parue dans *La Croix* [25 octobre 1903]).

Malgré l'intervention de Poincaré, la polémique perdura quelques temps encore : le contexte idéologique dans lequel elle s'exerçait se passait fort bien de ses explications et justifications de scientifique. Revenant sur la question dans *La valeur de la science* en 1901, Poincaré prit la précaution de mieux préciser sa pensée, une fois l'accalmie revenue. Mais cette polémique le poursuivit jusqu'à la fin de sa vie, en particulier lorsqu'il fut élu à l'Académie française en 1908. En témoignent alors d'autres articles, dont une virulente attaque contre les philosophes et les scientifiques rédigée par un évêque à la une du journal *Le Matin* du 20 février.

La revue *l'Illustrée* du 5 avril 1908 consacra quant à elle un long dossier à Poincaré pour marquer son élection à l'Académie. Il est en partie composé d'extraits d'une interview qu'il accorde au journaliste et dans laquelle il assure encore une fois le public profane : la Terre tourne !

Une dernière référence témoigne de la trace laissée en lui par cet épisode. Dans l'ouvrage *Ce que disent les choses*, qui rassemble des textes publiés en 1910 dans une revue pour enfants, Poincaré revient sur le mouvement des planètes et des étoiles et la rotation de la Terre. Une phrase résume ses réflexions : « Un seul des mouvements apparents est réel, la Lune tourne réellement autour de la Terre ; c'est elle en effet qui est la plus petite. »

## LES AUTEURS

Jean-Marc GINOUX est maître de conférences en mathématiques et en histoire des sciences à l'Université de Toulon.

Christian GERINI est maître de conférences en philosophie et histoire des sciences et des techniques dans la même université (laboratoire i3M) et membre du GHDSO, à Orsay.

## ✓ À ÉCOUTER

Jeudi 5 juillet, Christian Gerini et Jean-Marc Ginoux reviendront sur la polémique et évoqueront Poincaré à travers la presse de l'époque dans une émission de *La marche des sciences* consacrée à Poincaré, sur France Culture de 14h à 15h. [www.franceculture.com](http://www.franceculture.com)

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

J.-M. Ginoux et Ch. Gerini, Poincaré : une biographie au(x) quotidien[s], Ellipses, 2012.

Ch. Gerini, Henri Poincaré, Ce que disent les choses. Quand Henri Poincaré écrit pour les enfants, Hermann, 2010.

H. Poincaré, *La science et l'hypothèse*, Flammarion 1901 [rééd. 1968].

## LOGIQUE &amp; CALCUL

## L'accrochage des tableaux

*Comment accrocher un tableau avec  $n$  clous et une ficelle, de façon à ce qu'en enlevant n'importe lequel des clous, le tableau soit libéré et glisse vers le sol ?*

Jean-Paul DELANAYE

Plantez deux clous. Accrochez à ces deux clous un tableau de la façon la plus simple et la plus naturelle. Si l'un des clous tombe, la corde (et donc le tableau) reste accrochée à l'autre (voir la figure du haut ci-contre). Il va donc de soi (pour un mathématicien...) de se demander : est-il possible de disposer la corde autour des deux clous de façon que, si l'un quelconque des deux clous disparaît, le tableau tombe ? Nous nommerons ce montage *Podger*, en hommage à l'illustre accrocheur de tableau de Jerome K. Jerome qui faisait toujours tomber son tableau (voir l'encadré 3). Ce problème est analogue à un montage de type *fail-safe* dans l'industrie : si un organe est défaillant, l'ensemble de la machine s'arrête.

Une équipe aux États-Unis a étudié ce problème d'accrochage de tableau, à la frontière des mathématiques récréatives, de la topologie algébrique et de l'algorithmique. Elle est composée de Erik Demaine, Martin Demaine et Ronald Rivest (le R du système de cryptage RSA) du MIT. Voir Minsky, de l'Université de Yale, Joseph Mitchell, de l'Université Stony Brook, et Mihai Patrascu, des Laboratoires ATT de Florham Park.

La première mention de l'énigme de l'accrochage d'un tableau remonte à 1997. Elle est le fait de A. Spivak qui posa son casse-tête dans la revue *Quantum* consacrée aux divertissements mathématiques. Depuis, un grand nombre de variantes du petit problème ont imposé la mise au point d'outils généraux que les mathématiciens ont su découvrir, qui sont parfois de très beaux théorèmes... pas tous faciles !

Pour vous persuader qu'en enlevant un seul des deux clous, le tableau sera libéré et glissera jusqu'au sol, observez la figure du bas ci-dessus ou faites l'essai avec une ficelle. On peut trouver cette solution par tâtonnements. Il existe cependant une méthode qui conduit sans hésitation à la solution et à la solution de la généralisation suivante que nous nommerons *Le problème des  $n$  clous* : « Disposer la corde de soutien du tableau autour de  $n$  clous

de façon à ce que, si l'un quelconque des  $n$  clous disparaît, le tableau tombe. »

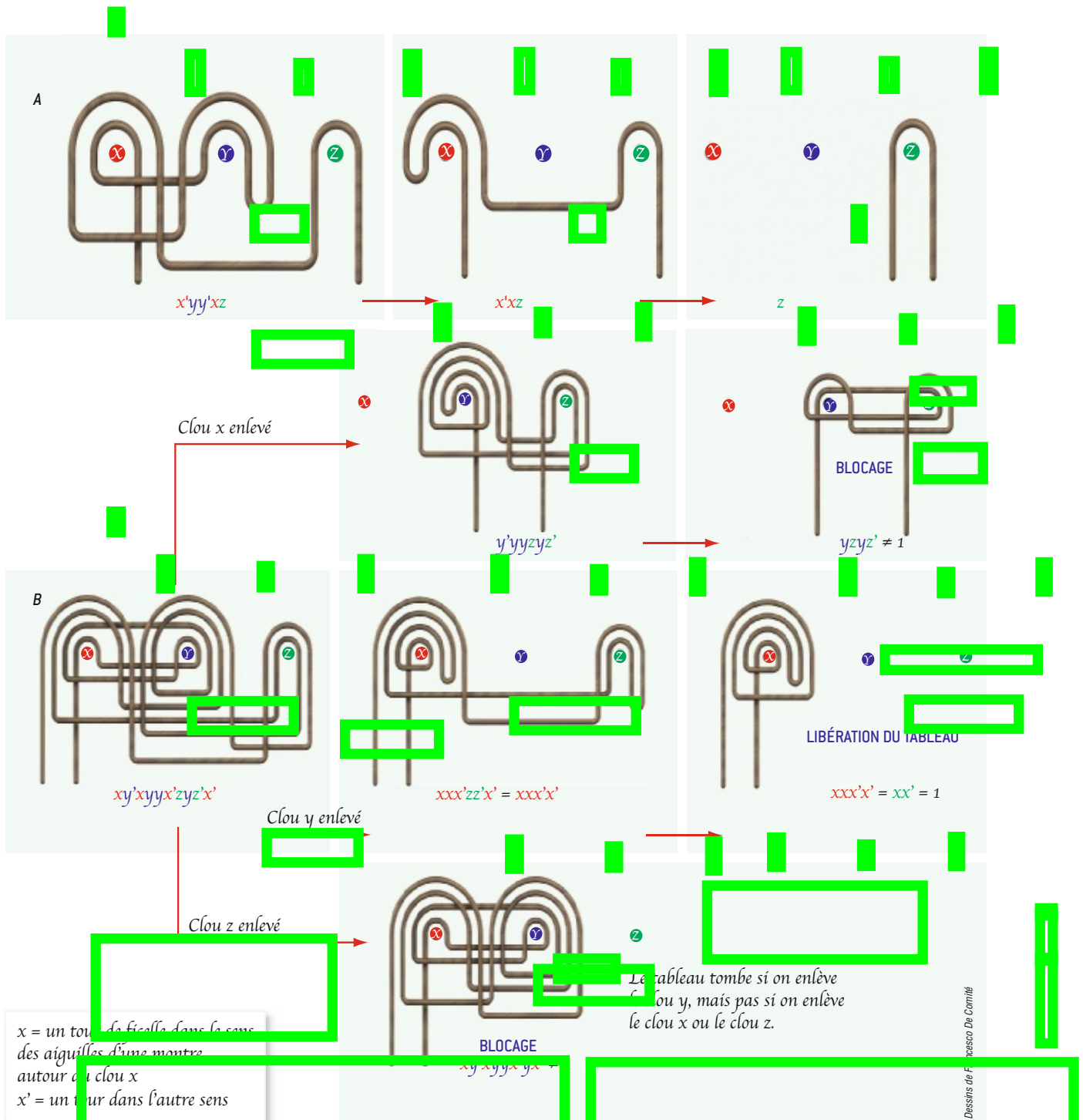
Heureusement, l'algèbre va nous secourir. L'idée, due à Neil Fitzgerald, d'un rapport entre le problème des  $n$  clous et la manipulation des expressions représentant des éléments du « groupe libre » (nous préciserons ce que c'est) permet de se poser d'autres questions et de les résoudre (voir l'encadré 4).

## Le groupe libre à l'aide

Le groupe libre de générateurs  $G$  est un système de calcul utile dans plusieurs domaines mathématiques, en particulier en topologie algébrique, la discipline mathématique qui, au moyen de l'algèbre, classe les nœuds et les surfaces. L'ensemble  $G$  des générateurs est, par exemple, constitué de trois éléments  $x, y$  et  $z$  ; on associe à chaque générateur un doublet  $x', y', z'$ . Leur ensemble est noté  $G'$ . On convient alors que toute expression composée d'une suite finie de symboles pris dans  $G$  ou dans  $G'$  désigne un élément du groupe libre. La suite vide, composée de zéro élément, se note 1 et, bien évidemment,  $1s = s1 = s$  pour tout élément  $s$  du groupe libre.

Deux exemples d'éléments du groupe libre de générateurs  $x, y, z$  sont  $s = x y x' y' z'$  et  $r = z z z z y x' x' y' z'$ . Les expressions ainsi construites se simplifient parfois, mais la seule et unique façon de le faire est, par





**1. SIMPLIFICATION DES PARCOURS DE FICELLE.** Le parcours  $x'y'y'xz$  (A) se simplifie en  $x'xz$ , puis en  $z$ , ce qui signifie qu'en tirant sur la ficelle placée pour suivre le parcours  $x'y'y'xz$ , on obtient le parcours  $z$ . Quand la formule associée à un parcours se simplifie totalement, un tableau accroché avec une ficelle suivant ce parcours tombe quand on tire sur la ficelle. Voyons l'effet de l'élimination d'un clou sur le parcours de ficelle  $xy'xyy'xyz'x'$  (B). Pour déterminer

l'effet de l'élimination du clou  $y$ , on retire tous les  $y$  et  $y'$  de la formule du parcours et on simplifie. Ici,  $xy'xyy'xyz'x'$  donne  $xxx'z'z'x'$ , qui donne  $xxx'x'$ , puis  $xx'$ , puis  $1$ . Si on enlève le clou  $y$ , le tableau tombe, mais si on enlève le clou  $x$ , le tableau reste accroché : l'élimination des  $x$  donne  $y'y'yz'z'$  qui se simplifie en  $yz'z'$ , qui ne se simplifie plus. Si on enlève le clou  $z$ , le parcours  $xy'xyy'xyz'x'$  donne  $xy'y'xy'x'$  qui ne se simplifie plus : le tableau reste accroché.

définition du groupe libre, de repérer une lettre et son double côté à côté et de les supprimer  $xx' = x'x = 1$ .

Lorsqu'on a ainsi supprimé une paire de symboles, il se peut qu'en apparaisse une autre du même type qu'on simplifiera à nouveau, etc. Par exemple,  $xu'xx'u'z'z = xu'u'z'z = xz'z = x$ . On a d'abord simplifié  $xx'$ , puis  $y'y'$ , et enfin  $z'z$ . L'élément du groupe libre, même s'il semblait plus compliqué, était en fait  $x$ .

Toutes les suites de symboles pris dans  $G$  et  $G'$  désignent un élément du groupe libre de générateurs  $G$ . Lorsqu'il n'existe plus aucune simplification possible, l'élément est dit « sous sa forme canonique ». Si deux éléments n'ont pas la même forme canonique, ils sont considérés différents. Notons que l'on n'est pas autorisé à permuter les symboles présents dans une expression : dans le groupe libre à deux générateurs  $x$  et  $y$ , l'élément  $xy$  n'est pas égal à  $yx$ .

## Un parcours de ficelle pour chaque formule

La mise en relation des figures faites d'une ficelle passant autour de clous plantés dans un mur avec les éléments du groupe libre est l'outil idéal pour résoudre les problèmes d'accrochage de tableaux. Pour ce faire, on associe un générateur à chaque clou planté dans le mur. S'il y a trois clous, on choisit par exemple de les noter  $x$ ,  $y$  et  $z$ .

Chaque parcours d'une ficelle autour des clous est associé à un élément du groupe libre, c'est-à-dire à une suite de symboles  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  de la manière suivante. On suit le trajet de la ficelle d'une extrémité à l'autre. À chaque fois qu'elle fait le tour du clou  $x$  dans le sens des aiguilles d'une montre, on écrit un  $x$  ; à chaque fois qu'elle fait le tour du clou  $x$  dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, on écrit un  $x'$ . On procède de même pour les clous  $y$  et  $z$ .

De cette façon, à chaque élément du groupe libre se trouve associé un parcours de la ficelle autour des clous, et réciproquement. L'opération de simplification  $xx' = x'x = 1$  correspond à l'idée que si la ficelle tourne autour du clou  $x$  dans le sens des aiguilles d'une montre puis immédiatement après autour de  $x$  dans le sens

inverse, alors en tendant la ficelle (sans déplacer ou enlever de clou), le parcours de la ficelle se simplifie et fait disparaître  $xx'$ .

Grâce au groupe libre et aux simplifications opérées, on saura si un tableau va tenir quand on l'accroche à une série de clous en faisant faire à la ficelle un parcours, aussi compliqué soit-il, autour des clous.

On suit le parcours de la ficelle en écrivant sa formule, une suite de symboles  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , ...,  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ , ... On simplifie l'expression en faisant disparaître autant que c'est possible les  $xx'$ ,  $xy'y'$ ,  $y'y'$ ,  $zz'$ ,  $z'z$ , etc. S'il ne reste plus rien à la fin du calcul, c'est que le tableau tombera (c'est un montage Podger) ; s'il reste quelque chose d'impossible à simplifier, c'est que le tableau restera accroché. Les lettres présentes dans la formule simplifiée indiquent les clous qui porteront le tableau.

Not sommes maintenant armés pour transformer le problème général à  $n$  clous en un petit problème algébrique que nous pourrions traiter sans emmêler de ficelles.

## Le montage Podger

Si l'on a un parcours autour de trois clous  $x$ ,  $y$  et  $z$ , par exemple  $xy'xy'yz'yz'x'$  et qu'on enlève un clou, par exemple  $y$ , comment savoir si le tableau glisse au sol ?

C'est très simple : il suffit de retirer tous les  $y$  et  $y'$  de l'expression algébrique du parcours de la ficelle, et de simplifier ce qui reste autant que possible (voir l'encadré 1). Le problème à  $n$  clous est maintenant devenu purement symbolique. Il consiste à trouver une expression  $s$  (un élément du groupe libre de générateurs  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) telle qu'elle ne se simplifie pas en 1 (il ne faut pas que le tableau tombe au sol quand tous les clous sont présents) et qui se simplifie en 1 quand on enlève l'un des clous,  $x_1$ , ou  $x_2, \dots$ , ou  $x_n$ .

Il devient immédiat que la solution la plus courte au problème des deux clous comporte quatre symboles :  $xy'xy'$  (ou  $xy'x'y$ , ou  $x'y'xy$ , ou  $x'y'yx$ , ou  $y'xyx$ , ou  $y'xy'x$ , ou  $y'x'yx$ ).

L'expression ne se simplifie pas et l'on voit que la suppression du clou  $x$  donne 1, de même que la suppression du clou  $y$  (voir le dessin à gauche). Il existe une infinité d'autres solutions au problème des deux clous dont voici l'une d'elles,  $xy'yx'yx'y'y'y'$ , qui est bien sûr inutilement compliquée.

Grâce à sa traduction algébrique, par tâtonnements – j'ai réellement procédé ainsi ! – on trouve assez vite une solution au problème des trois clous. Je suis tombé sur celle-ci :  $x'y'zy'xy'x'z'x'y$ . Vérifions-la.

Suppression du clou  $x$  :

$$y'zy'zy'z'y = y'zy'z'y = y'y = 1.$$

Suppression du clou  $y$  :

$$x'zx'x'z'x = x'z'z'x = x'x = 1.$$

Suppression du clou  $z$  :

$$x'y'y'xy'xy'xy = x'x'y'x'xy = x'x'y'y = x'x = 1.$$

Examinons maintenant le problème avec  $n$  clous. Pour le résoudre, voici une méthode générale qui fonctionne de proche en proche. On imagine qu'on dispose d'une solution pour le problème à  $n$  clous, et on en construit une pour le problème à  $n+1$  clous. Comme



## 2. La solution du problème à trois clous

Le problème consiste à trouver l'enroulement *Podger* de la ficelle tel que si l'on enlève un clou, la ficelle est libérée et le tableau tombe. Une fois ramené à l'algèbre, on trouve assez vite, en tâtonnant, une solution au problème des trois clous. Par exemple celle-ci (qui n'est pas unique) :  $x'y'zyxy'x'z'xy$ .

Suppression du clou x (A) :

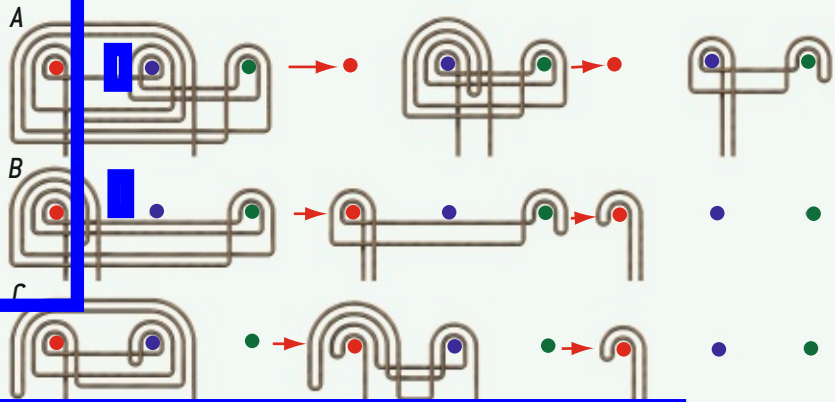
$y'zyy'z'y \rightarrow y'zz'y \rightarrow y'y \rightarrow 1$ .

Suppression du clou y (B) :

$x'zxx'z'x \rightarrow x'zz'x \rightarrow x'x \rightarrow 1$ .

Suppression du clou z (C) :

$x'y'xy'x'xy \rightarrow x'xy'x'xy \rightarrow x'xy'y \rightarrow x'x \rightarrow 1$ .



Dessins de Francesco De Comilé

## 3. Oncle Podger et son tableau

Il souleva le tableau, et vlan ! Le tableau lui échappa et tombait par terre. La toile était sortie du cadre. Mon oncle essayait de sauver le verre, le prisait, se coupait, sautillait par toute la pièce, cherchant son mouchoir dans tous les coins et ne le trouvait pas, pour la bonne raison qu'il était dans la poche du veston qu'il avait enlevé. Mais où avait-il mis son veston ? Il ne le savait plus ; il fallait que toute la maisonnée, cessant de chercher après ses outils, se mette en quête du veston, tandis qu'il allait et venait, affolé, barrant à chaque instant le passage à ceux qui l'aidaient.

— Il n'y a donc personne ici, criait-il, qui sache où j'ai mis mon veston ? Jamais je n'ai vu pareille collection d'empotés ! (...) Il se levait, furieux, et l'on s'apercevait alors qu'il était assis sur ce qu'il cherchait.

— Oh ! Vous pouvez vous dispenser de chercher davantage, disait-il. Je l'ai trouvé. Je n'ai eu besoin de personne ! On ne peut compter que sur soi ! (...) Après une demi-heure passée à le panser, à lui acheter un autre verre ; quand les outils, l'échelle, la chaise, la chandelle avaient été apportés à pied d'œuvre, l'oncle faisait un nouvel essai : toute la famille (y compris la bonne et la femme de ménage) faisant le cercle autour de lui, prête à lui rendre service. Deux personnes étaient chargées de le soutenir, l'un devant, l'autre derrière ; l'un lui passait un clou, et naturellement, le

— Là, dis-je, il, comme offensé, voilà ce clou perdu ! (...) On remarqua que l'oncle avait égaré son marteau.

— Où est mon marteau ? criait-il. Qu'est-ce que j'ai fait de mon marteau ? (...) Nous ne trouvions le marteau ; mais voilà qu'alors l'oncle ne retrouvait plus la marque qu'il avait faite sur le mur, l'endroit exact où il fallait enfoncer le clou. Chacun de nous, à tour de rôle, était invité à monter sur la chaise à côté de lui, pour voir si d'autres yeux ne pourraient pas retrouver la place. Or, chacun la trouvait en un point différent. L'oncle, alors, nous traitait d'idiots, l'un après l'autre, et nous disait de redescendre, prenait sa règle, mesurait de nouveau, trouvait un point différent, et recommençait.

Chaque fois qu'il mesurait, il prenait trente et un pouces trois huitièmes à partir de l'angle de la pièce, cherchait à calculer cela de tête et devenait littéralement enragé. Chacun essayait de calculer mentalement, et tous arrivaient à des résultats différents et se moquaient les uns des autres ; au milieu du tapage, l'oncle s'apercevait qu'il avait oublié la mesure. On ne savait plus de quoi il fallait trouver la moitié. Il ne restait plus qu'à recommencer. L'oncle se servait cette fois, d'un bout de ficelle ; mais au moment où il se penchait, faisant avec la ficelle un arc de cercle, pour tâcher de toucher un point sur le mur, trois empan au moins au-delà de ce qu'il était possible d'atteindre, la ficelle lui échappait, l'oncle

glissait, produisant un curieux accord dissonant par la manière avec laquelle sa tête et son corps avaient frappé vingt notes ensemble. (...) Enfin Podger marquait de nouveau la bonne place, posait dessus, de la main gauche, la pointe du clou, et, au premier coup, il s'écrasait le pouce, poussait un grand cri, laissait tomber le marteau sur les orteils de quelqu'un. (...) Alors nouvelle tentative. Au second coup, le clou traversait le plâtre d'outre en outre, la moitié du marteau aussi. Et l'oncle Podger suivait le marteau, le poussait contre le mur d'un élan presque suffisant pour lui écraser complètement le nez.

Il nous appartenait de ramasser la règle et la ficelle, et de faire un nouveau trou ; vers minuit, enfin, le tableau était accroché, un peu de travers, il est vrai, et pas très solidement, peut-être. En revanche, le mur avait l'air d'avoir été ratissé. Tout le monde était éreinté, mort de fatigue, l'oncle Podger excepté.

Voilà, disait-il, mettant lourdement pied à terre... sur le cor de la femme de ménage, et considérant avec un orgueil évident le désordre dont il était l'auteur, qu'il n'aurait jamais dû se laisser aller à ce qui eussent dérangé un ouvrier au lieu de faire comme celle-là !

Jerome K. Jerome, *Trois hommes dans un bateau*, 1899

## 4. Une liste de dix problèmes

**Problème 1** (1 parmi 3). Quand on enlève un des trois clous  $x_1$ ,  $x_2$  ou  $x_3$ , le tableau tombe.

**Problème 2** (2 parmi 3). Quand on enlève un des trois clous  $x_1$ ,  $x_2$  ou  $x_3$ , le tableau reste accroché, mais si on enlève deux clous quelconques, il tombe.

**Problème 3** (1, 4, 2). Quand on enlève le clou  $x_1$ , le tableau tombe. Quand on enlève  $x_2$  ou  $x_3$ , il reste accroché. Quand on enlève  $x_2$  et  $x_3$ , il tombe.

**Problème 4** (1 parmi 4). Quand on enlève un des quatre clous  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  ou  $x_4$ , le tableau tombe.

**Problème 5** (2, 3, 1, 4). Quand on enlève un des quatre clous  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ou  $t$ , le tableau reste accroché, mais si on enlève deux clous, il tombe.

**Problème 6** (5, 3, 2, 1, 4). Quand on enlève un ou deux des quatre clous  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  ou  $x_4$ , le tableau reste accroché, mais si on enlève trois clous, il tombe.

**Problème 7** (2+2 parmi 2+2). Le tableau est accroché à deux clous bleus et deux clous rouges. Quand on enlève deux clous bleus ou les deux clous rouges, il tombe. Quand on enlève un clou bleu et un clou rouge, il reste accroché.

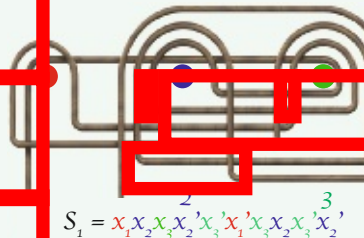
**Problème 8** (1+2 parmi 2+2). Le tableau est accroché à deux clous bleus et deux clous rouges. Quand on enlève un clou bleu et un clou rouge, il tombe. Quand on enlève uniquement un clou rouge (et pas de bleu), il reste accroché.

**Problème 9** (1+3 parmi 3+3). Le tableau est accroché à trois clous bleus et trois clous rouges. Quand on enlève un clou bleu, il tombe. Quand on enlève deux clous rouges, il tombe. Quand on enlève uniquement un ou deux clous rouges (et pas de bleu), il reste accroché.

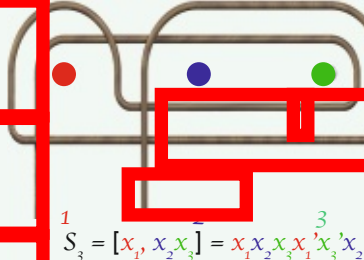
**Problème 10** (1+2 parmi 3+3). Le tableau est accroché à trois clous bleus et trois clous rouges. Quand on enlève un clou bleu, il tombe. Quand on enlève deux clous rouges, il tombe. Quand on enlève uniquement un ou deux clous rouges (et pas de bleu), il reste accroché.

Dans les réponses ci-contre, la notation  $[A, B]$  représente la formule  $ABA'B'$ .

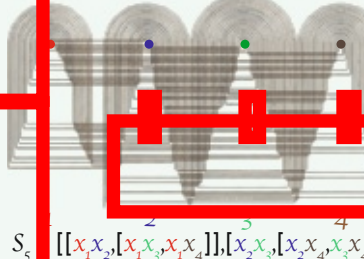
Problème 1



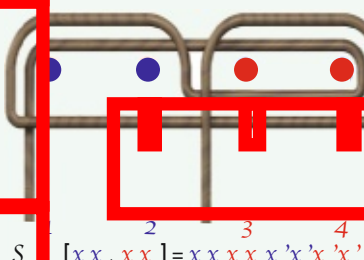
Problème 3



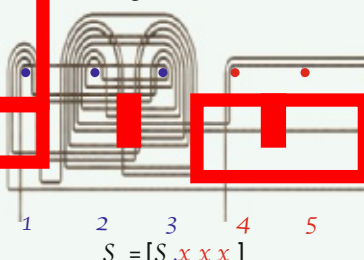
Problème 5



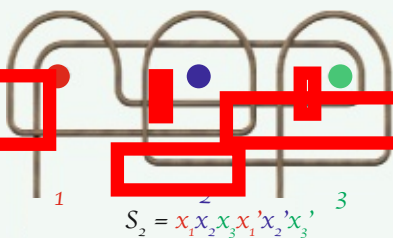
Problème 7



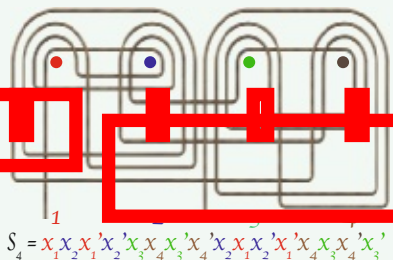
Problème 9



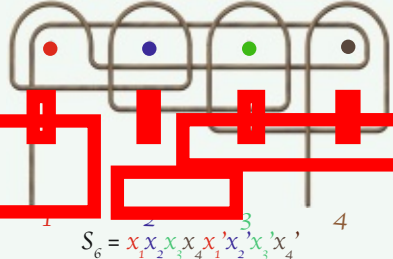
Problème 2



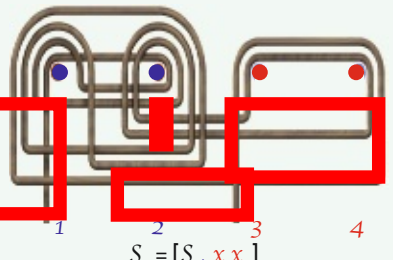
Problème 4



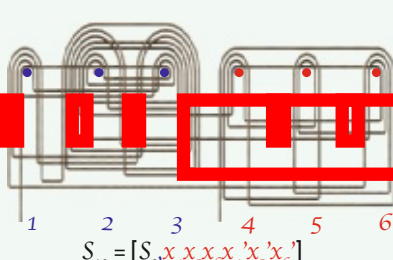
Problème 6



Problème 8



Problème 10



on en connaît une pour le problème à 2 clous, on pourra amorcer la construction et résoudre petit à petit le problème pour 3, 4, ...,  $n$  clous.

Soit  $s$  une solution au problème avec  $n$  clous. Notons  $s'$  la suite qui annule  $s : s's' = 1$  ( $s'$  est l'« inverse » de  $s$ ). C'est la suite de symboles qu'on obtient en inversant l'ordre des éléments de  $s$ , en ajoutant un « ' » sur les lettres qui n'en ont pas et en supprimant le « ' » de celles qui en ont (par exemple :  $(xyz'x'y' = y'xz'y'x')$ ). Si  $z$  se réfère au  $(n+1)$ -ième clou, alors la suite  $szs'z'$  sera une solution du problème pour  $n+1$  clous. La formule permet de passer d'une solution pour  $n$  clous à une solution pour  $n+1$  clous.

En effet, si on enlève une lettre parmi les  $n$  premières,  $s$  devient 1 (car c'est une solution pour  $n$  clous), de même que  $s'$ . Il ne reste alors que  $zz'$ , qui se simplifie en 1. Si on enlève  $sz$ , alors  $szs'z'$  devient  $s's'$  qui devient 1 aussi. Chaque suppression d'un clou fait donc tomber le tableau au sol. C'est le montage *Podger* que nous voulions.

Appliquons cette méthode pour trouver la solution du problème des trois clous à partir de la solution du problème à deux clous  $S_2 = xyx'$ . On a  $S_2' = yxy'x'$ , et donc :  $S_3 = S_2zS_2'z' = xyx'y'zyxy'x'z'$ . Ce n'est pas celle que nous avons trouvée par tâtonnements, mais elle a la même longueur. La méthode décrite donne une solution au problème des trois clous (et plus généralement au problème des  $n$  clous). Cela n'interdit pas bien sûr l'existence d'autres solutions.

## Une ficelle à tout faire

De la même façon, on obtient la solution du problème des quatre clous à partir de celle pour trois clous :  $S_4 = S_3tS_3't' = xyx'y'zyxy'x'z'tzxyx'y'zyxy'x't'$ . Une multitude d'autres problèmes d'accrochage sont envisageables (voir l'encadré 4). Il se trouve que l'équipe de chercheurs américains a réussi à exploiter le fait que tout ce qu'il est envisageable de demander à une corde faisant tenir un tableau peut l'être. Voyons ce que cela signifie.

Imaginons que l'on souhaite accrocher le tableau à cinq clous  $x, y, z, t, u$  de façon qu'il tienne, mais que si on enlève les clous  $x$  et  $y$ , ou les clous  $x$  et  $z$ , ou les clous  $y$  et  $z$ , ou les clous  $y$  et  $t$ , ou les clous  $z$  et  $t$ , ou les clous  $t$  et  $u$ , alors le tableau tombe, et dans aucun autre cas (c'est-à-dire quand  $x$  ou  $y$  restent, et que  $x$  ou  $z$  ou  $t$  restent, et  $y$  ou  $t$  ou  $u$  restent).

Est-ce possible ? Oui, les six chercheurs ont montré comment et leur résultat vaut pour tout problème du même type, c'est-à-dire pour toute disjonction de conjonctions (sans négation) :  $(x_1 \text{ et } \dots \text{ et } x_i) \text{ ou } (y_1 \text{ et } \dots \text{ et } y_j) \text{ ou } \dots \text{ ou } (z_1 \text{ et } \dots \text{ et } z_k)$ .

Par ailleurs, il est clair qu'on ne peut pas demander n'importe quoi. Il est par exemple impossible de disposer la ficelle pour que le tableau tombe si on enlève le clou  $x$ , mais pas si on enlève  $x$  et  $y$ . Cette condition, dite de monotonie, est en fait exactement celle qui assure qu'il y a une solution. Quand l'énoncé du problème est monotone (autrement dit pas absurde), le problème peut se réécrire comme une disjonction de conjonctions et admet donc une solution. En clair : tous les cas où l'on peut raisonnablement envisager qu'il y ait une solution sont effectivement des cas où il y a une solution, et on s'en trouve.

On n'a pas fait le tour complet des problèmes d'accrochage de tableaux. D'autres questions liées à la complexité des algorithmes à mettre en œuvre pour résoudre ces problèmes sont abordées. Certaines sont résolues et d'autres, comme c'est toujours le cas en mathématiques face à une problématique riche, sont encore ouvertes et attendent leur vainqueur. Voici deux des problèmes en attente de solution :

– La solution la plus courte (en nombre de symboles) pour traiter le problème des  $n$  clous (enlever un des clous fait tomber le tableau) compte-t-elle moins de  $n^2$  symboles ?

– Une ficelle autour de clous soutenant un tableau étant donnée (par son parcours ou sa formule), existe-t-il un algorithme polynomial permettant de connaître le plus petit ensemble de clous qui libère le tableau ?

Lorsque vous visiterez la prochaine exposition d'art contemporain de tableaux monochromes (si, si, ça existe !) et que vous vous ennuiez un peu, pensez à ces problèmes qui rendent le dos des tableaux plus intéressants que leur face, et aux artistes mathématiciens qui y travaillent.

## L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

## BIBLIOGRAPHIE

E. Demaine *et al.*, *Picture-Hanging Puzzles*, *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Fun with Algorithms FUN 2012*, Lecture Notes in Computer Science, Venice, Italy, June 4-6, 2012. [<http://arxiv.org/pdf/1203.3022v1.pdf>]

A. Spivak, *Brainteasers B 201 : Strange painting*, *Quantum*, page 13, mai-juin 1997.

## ART &amp; SCIENCE

# Van Gogh et les tournesols mutants

Certains des tournesols peints par Van Gogh à Arles ressemblent à des pompons. Des généticiens viennent d'élucider les mécanismes qui expliquent cet aspect.

Loïc MANSIN

Je suis en train de peindre avec l'entraide d'un Marseillais mangeant la bouillabaisse, ce qui ne t'étonnera pas, lorsqu'il s'agit de peindre des grands tournesols.

Van Gogh, *Lettres à Théo*.

Le 20 février 1888, Vincent Van Gogh (1853-1890) s'installe à Arles. En août de cette année, il peint sa première série des *Tournesols*. Elle est constituée de quatre tableaux et sera complétée par trois autres en janvier 1889. À chaque fois, un bouquet de 3 à 15 tournesols est placé dans un vase, sur un fond jaune ou bleu. Certains étaient destinés à décorer la chambre de Paul Gauguin, qui rejoint le peintre néerlandais en octobre 1888. D'ailleurs, dans une de ses œuvres, Gauguin a représenté Van Gogh en train de peindre un bouquet de tournesols. Peut-être *Vase avec cinq tournesols*, le tableau de la série qui fut détruit au Japon, en 1945, après un raid aérien.

À chaque fois, les tournesols sont montrés à différentes étapes de leur vie, de la floraison jusqu'au flétrissement. Mais ils se distinguent aussi par leur morphologie. En effet, certains ressemblent à des pompons ! Par exemple, sur le tableau conservé à la *National Gallery*, à Londres, on en compte sept (voir la figure a, page ci-contre). John Burke de l'Université de Géorgie, à Athens, aux États-Unis, et ses collègues se sont intéressés aux bases génétiques de cet aspect.

Avant de décrire leurs résultats, détaillons l'anatomie d'un tournesol (*Helianthus annuus*). Il appartient à la famille des Astéracées (arnica, safran, etc.), la plus grande du règne végétal (topinambour, pis-

conlit, âquerette, artichaut...). Les fleurs de tournesols, nommées fleurons, sont réunies sur des capitules (un réceptacle floral charnu). Ainsi, ce que l'on nomme une « fleur » de tournesol est en fait constitué d'une multitude de fleurs vraies, les fleurons serrés sur un capitule. Dans le tournesol commun (*figure b*), les fleurons de la périphérie sont ligulés c'est-à-dire qu'ils sont dotés d'une languette (la ligule, que l'on prend à tort pour un pétales), tandis que ceux du centre sont tubulés, en forme de tube (*figure c*). Les seuls des derniers sont pourvus d'organes reproducteurs.

## Le gène muté dans les tournesols en pompons participe au contrôle de la symétrie florale.

Les tournesols en pompons sont des fleurs doubles. Dans ses *Lettres écrites de la moinette*, en 1764, Jean-Jacques Rousseau décrit le phénomène : « La fleur double est celle dont quelqu'une des parties est multipliée au-delà de son nombre naturel [...]. Ce mot de fleur double ne marque pas dans le nombre des pétales une simple duplication, mais une multiplication quelconque. » Dans les fleurs doubles de tournesol (*figure d*), au moins plusieurs rangs sinon la totalité des fleurons tubulés dans le tube commun, dit sauvage, sont ligulés (*figure e*). L'équipe de J. Burke a voulu comprendre les mécanismes qui expliquent ces fleurs doubles.

Ils ont commencé par croiser des tournesols de type sauvage avec d'autres de type

fleur double. Les résultats sont conformes aux lois qui ont été définies par Mendel au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, quelque 20 ans avant que Van Gogh ne peigne les tournesols. Le caractère fleur double résulte de la mutation d'un seul gène et elle est dominante. D'autres croisements ont mis en évidence une seconde mutation du même gène, qui est récessive : elle se traduit par des fleurons d'un genre particulier : ils sont en forme de tube allongé et jaune, et contiennent des organes reproducteurs (voir les figures f et g). En d'autres termes, ils sont intermédiaires entre les fleurons ligulés et ceux tubulés des tournesols communs.

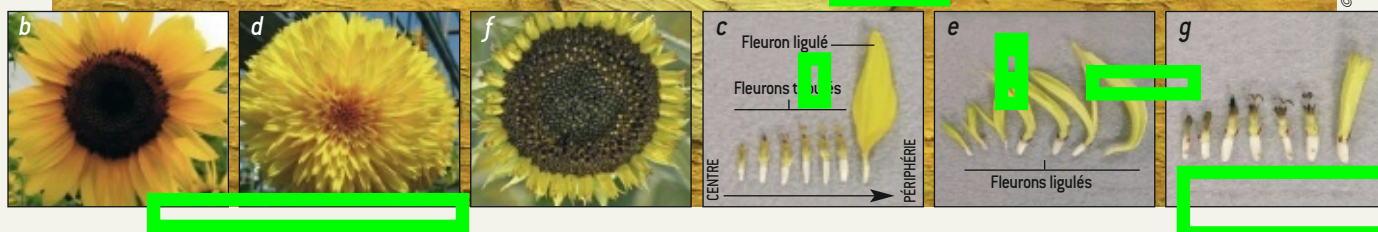
Les généticiens ont identifié le gène en cause et l'ont séquencé : il s'agit du gène *HaCYC2c* qui code un facteur de transcription, c'est-à-dire une protéine qui favorise l'expression d'autres gènes. La famille du gène *HaCYC2c* participe au contrôle de la symétrie florale. Dans le cas des fleurs doubles, la mutation consiste en l'insertion d'un nucléotide dans le promoteur du gène, celui-ci s'exprime alors de façon anormale dans les fleurons centraux. Dans le second cas, la mutation résulte de l'insertion de transposons (des gènes mobiles) dans le gène lui-même et interdit son expression dans tous les fleurons.

Ce dernier type de tournesols est absent des tableaux de Van Gogh. N'en a-t-il pas trouvé ? Les trouvait-il peu esthétiques ? Ni l'un ni l'autre n'est dans les *Lettres à Théo* ne le disent.

M. Charbonnet et al., Genetic analysis of floral symmetry in Van Gogh's sunflowers reveals independent recruitment of CYCLOIDEA genes in the Asteraceae, *PLoS Genetics*, vol. 8(3), e1002628, 2012.



© Gustavo Tomsich/CCRBIS



## IDÉES DE PHYSIQUE

## Plus vite que le vent

*Certains véhicules à propulsion éolienne remontent le vent de face... et, en vent arrière, vont plus vite que lui !*

Jean-Michel COURTY et Edouard KIERLIK

Le vent arrière qui gonfle et pousse les voiles d'un bateau le propulse sur les flots sans jamais l'entraîner au-delà de sa propre vitesse. Pour aller plus vite que le vent, les voiliers, chars à voile compris, doivent changer d'allure et prendre le vent de travers, « au large » comme disent les marins, ou « au près » si l'on veut remonter le vent. Mais ce n'est pas une fatalité dictée par les lois de la physique. En effet, d'ingénieux mécanismes permettent à des véhicules de tirer l'énergie du vent pour l'affronter de face ou pour aller plus vite que lui en se déplaçant exactement dans le même sens ! Ces engins ne sont propulsés par des voiles, mais par des hélices. Comment fonctionnent-ils et à quelles vitesses pourraient-ils atteindre ?

## Un peu comme un yo-yo

Dépasse le vent en propulsion éolienne est contre-intuitif. Mais un phénomène analogue peut être constaté avec un simple yo-yo, ou avec un système particulier à quatre roues. Commençons par le yo-yo. Après avoir enroulé partiellement sa ficelle sur le moyeu, posons-le au sol de telle sorte que le reste de la ficelle pende sous le moyeu. Donnons à notre main le rôle du vent et tirons la ficelle. La force exercée fait tourner le yo-yo qui, au bout d'un instant, avance vers notre main et, plus éton-

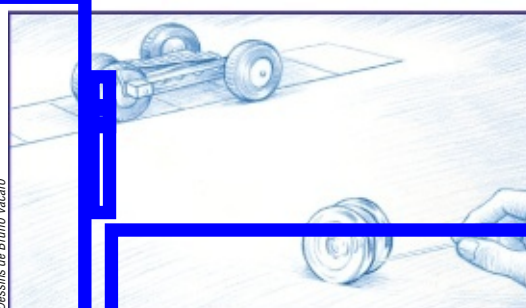
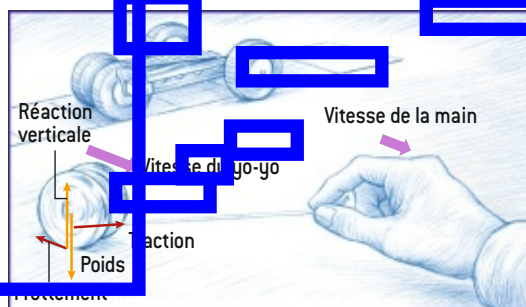
nant, gagne du terrain par rapport à cette dernière (voir la figure 1). Comment cela est-il possible ?

Si l'on tenait le yo-yo par son axe central, la rotation du yo-yo résulterait dans ce cas du moment de la force exercée. Mais au sol, il ne faut pas oublier le moment de la

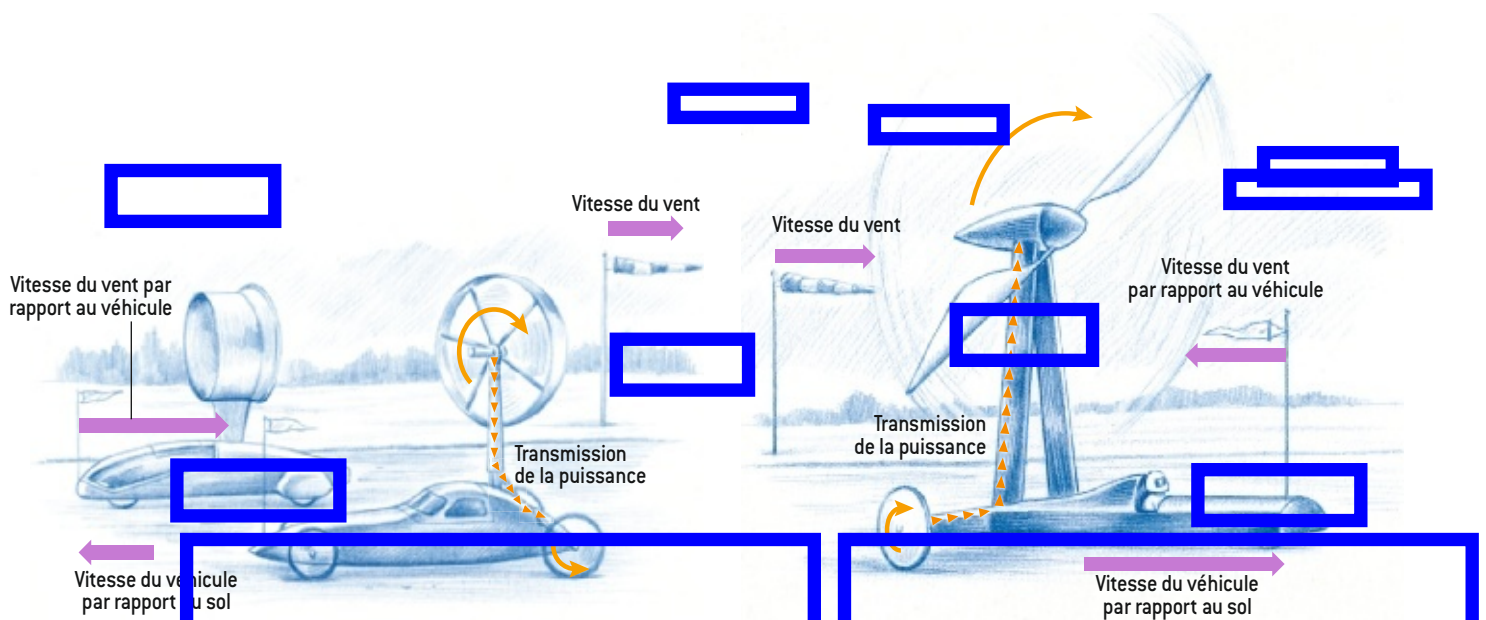
force de réaction. En vertu des lois de Coulomb, si le yo-yo ne glisse pas, cette force ne dépend que du poids du yo-yo et du coefficient de frottement avec le sol, et sa composante horizontale est de sens opposé à la force exercée. Comme le rayon du disque du yo-yo est plus grand que son moyeu, le moment de la réaction peut être, par un effet de levier, supérieur au moment de la traction exercée et de sens opposé. La conséquence est que le yo-yo remonte le long de la ficelle, qui s'enroule sur le moyeu : le yo-yo rattrape la main que l'on met en mouvement !

Pour nous rapprocher de la situation éolienne, oublions la ficelle et construisons un petit véhicule à quatre roues, dont les deux roues arrière sont plus écartées de l'axe central que les roues avant. Couplons l'essieu du train avant et celui du train arrière au moyen d'une chaîne reliant deux pignons de tailles différentes, choisis afin que la vitesse de rotation des roues arrière soit plus rapide que celle des roues avant, par exemple trois fois plus rapide, pour retrouver l'effet de levier précédent.

Plaçons ce drôle de véhicule à cheval sur un tapis roulant, de telle sorte que les roues avant soient sur le tapis et les roues arrière de part et d'autre sur le sol fixe (voir la figure 1). Il s'ensuit que si le tapis est tiré à la vitesse  $V$ , la vitesse du véhicule par rapport au sol devra être  $k$  fois supérieure à la vitesse du véhicule par rapport au tapis. Cette condition est vérifiée seulement si la vitesse du tapis par rapport au



**1. LE YO-YO AVANCE PLUS VITE** que la main qui tire sa ficelle. Le moment de la force de frottement étant supérieur au moment de la force de traction, le yo-yo tourne en enroulant la ficelle, d'où sa vitesse supérieure à celle de la main. Un système analogue peut être obtenu avec un véhicule (en haut à gauche) dont les deux roues avant reposent sur un tapis roulant et les deux roues arrière sont en contact avec le sol immobile, le train avant étant couplé au train arrière de façon que les roues arrière tournent plus vite que les roues avant. Quand le tapis roule à une certaine vitesse, le véhicule se déplace alors dans le même sens que le tapis, mais avec une vitesse supérieure.



**2. UN VENT DE FACE PEUT ÊTRE EXPLOITÉ** pour faire tourner une hélice montée sur un véhicule sans moteur. La rotation de l'hélice étant transmise aux roues du véhicule, ce dernier peut alors remonter le vent, par une propulsion purement éolienne.

tapis est égale à  $V/(k-1)$  : le mobile remonte donc le long du tapis roulant. En revanche, si les engrenages sont dans le rapport inverse ( $k < 1$ ), le véhicule se déplace, mais dans la direction opposée au tapis ! Dans le cas d'un rapport simple ( $k = 1$ ), le système ne peut évidemment pas fonctionner.

## Une hélice couplée aux roues et du vent

Comment réaliser ce type de véhicule avec du vent à la place d'un tapis roulant ? Il faut pour cela utiliser un dispositif qui s'appuie sur l'air sans « glisser » dessus et muni d'un système d'engrenage pour faire levier. Ce qui s'en rapproche le plus est une hélice couplée aux roues de telle sorte qu'elle puisse les actionner (voir la figure 2). Quelle force les roues peuvent-elles exercer sur le sol pour propulser le véhicule ? Avec une démultiplication suffisante et une bonne transmission mécanique, cette force peut être aussi grande que souhaité, dans le sens du vent ou contre lui. La seule contrainte est *in fine* énergétique : la puissance de la force motrice doit être inférieure à la puissance que fournit le vent à l'ensemble du véhicule.

En termes de forces, cela signifie que le produit de la force motrice par la vitesse

du véhicule au sol doit être inférieur au produit de la force du vent par la vitesse relative du vent par rapport à l'engin. Si le véhicule est à l'arrêt, on comprend alors que la force de propulsion peut être très élevée et que l'on peut sans souci remonter le vent à petite vitesse. Pourquoi pas aussi vite que l'on veut ? D'une part, parce qu'une partie de l'énergie éolienne est dissipée par les frottements aérodynamiques sur l'engin ; d'autre part, parce que la conversion de puissance entre l'hélice et les roues motrices ne saurait être parfaite. D'où l'importance de la conception du véhicule.

Avec un rendement énergétique total de 50 pour cent, on trouve que l'on peut remonter le vent à une vitesse égale en module à la vitesse du vent. Est-ce réalisable ? Depuis quelques années, l'*Aeolus Race*, aux Pays-Bas, propose des équipes d'universitaires dans une course face au vent. Lors des phases de tests de l'édition de l'an dernier, un nouveau record a été établi avec une vitesse égale à 75 pour cent de la vitesse du vent (légèrement incliné de 20 degrés par rapport à la marche de l'engin). La marge de progression reste donc importante. Peut-être dès cette année pour l'édition 2012 qui se tiendra à Den Helder du 22 au 25 août ?

Voyons comment on peut utiliser ce dispositif pour aller plus vite que le vent, en

**3. PAR VENT ARRIÈRE, ON PEUT DÉPASSER LA VITESSE DU VENT.** En effet, si la rotation des roues est utilisée pour faire tourner l'hélice, cette dernière fournit alors une force de propulsion qui accélère le véhicule, même quand il a atteint la vitesse du vent.

## LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard MERIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Merik sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Gaunaa *et al.* Theory and design of flow-driven vehicles using rotors for energy conversion *Proceedings EWE 2009* Marseille, 2009.

B. L. Blackford, The physics of a push-me pull-you boat, *American Journal of Physics*, vol. 46, pp. 1004-1006, 1978.

Vidéo du véhicule à quatre roues sur un tapis roulant : <http://www.youtube.com/watch?v=pwB2MnMqZs>

vent arrière. Dans ce cas de figure, à mesure que le véhicule accélère, la vitesse du vent par rapport au mobile diminue ; il en est donc de même de la puissance fournie par le vent qui va jusqu'à s'annuler si le véhicule atteint la vitesse du vent. La solution, très astucieuse, est d'inverser le dispositif : les roues entraînées par le mouvement du véhicule, font tourner une hélice devenue alors propulsive comme dans le cas d'un avion (voir la figure 3).

Imaginons que le véhicule avance à la vitesse du vent (en étant par exemple lancé grâce à une voile au large et en revenant vent arrière...). Un bilan d'énergie montre que l'on peut obtenir de l'hélice une force propulsive supérieure à la force exercée par le sol sur les roues. Si nous allons à la vitesse du vent, aucune puissance n'est fournie ou reçue du vent ; en revanche, le moment

de la force de réaction du sol, qui fait tourner les roues du véhicule, peut nous fournir une puissance égale au produit de la composante horizontale de la réaction par la vitesse du véhicule. Pour un rendement total de 50 pour cent, on trouve que l'engin peut atteindre deux fois la vitesse du vent soit une vitesse relative (par rapport au vent) égale à la vitesse du vent.

En juin 2010, le rendement du *Blackbird* de Rick Cavallaro était encore meilleur, puisque ce véhicule a atteint 2,85 fois la vitesse du vent. Cette première résultait du souhait de cet ingénieur de mettre fin à un débat animé sur la possibilité réelle d'aller plus vite que le vent en vent arrière. Le débat s'était enlisé dans des échanges stériles autour de grands principes. Comme toujours en physique, c'est l'expérience qui a eu le dernier mot.

universcience présente

la Cité des sciences et de l'industrie

# les conférences

entrée libre

## Curiosity sur Mars

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

> Réservation conseillée sur [conferences@universcience.fr](mailto:conferences@universcience.fr)

programme complet sur [www.universcience.fr](http://www.universcience.fr)

En partenariat avec

Avec le soutien de

SAF, L'ASTRONOMIE, SCIENCE, CIEL ESPACE, Planet astronomy.com

## SCIENCE &amp; GASTRONOMIE

## Pas de cru sans précaution

Dans la jungle des micro-organismes, certains sont bénéfiques, d'autres très dangereux. Sachons nous en prémunir en recourant à des produits sanitaires classiques.

Hervé THIS

Les levains sont des préparations capricieuses, que les boulangers cherchent à maîtriser. Ces pâtes un peu molles, faites de farine et d'eau, ensimencées spontanément par des levures sauvages de l'environnement (par opposition aux levures domestiques, que l'on ajoute), fermentent et servent à faire des pains au goût puissant : les goûts d'un pain au levain et d'un pain à la levure domestique peuvent être aussi différents que ceux d'un bolet et d'un champignon de Paris.

Cependant, même quand les conditions de leur développement sont réunies (temps chaud et humide, par exemple), les levains ne se font parfois pas, et les boulangers recourent à des expédients variés : ajouts de raisins secs, de pomme, de figue... Chaque région a son truc, avec parfois des pièges : par exemple, certains raisins secs blonds sont traités par du dioxyde de soufre, composé qui tue les micro-organismes !

Pour quelques micro-organismes bénéfiques (utiles pour faire pains, saucissons, yaourts, vins, bière...), il y a beaucoup de micro-organismes pathogènes. Telles sont notamment certaines variétés d'*Escherichia coli* (O157:H7), qui sont entérohémorragiques et dont on sait aujourd'hui qu'elles prolifèrent même sur des métaux... où leur survie semble pourtant difficile.

*Escherichia coli* O157:H7 est reconnue comme un pathogène de l'alimentation depuis 1982. Cette bactérie produit des toxines qui causent des colites hémorragiques et des syndromes urémiques hémolytiques. On sait aujourd'hui que les bovins sont les principaux réservoirs de la bactérie,

que la principale source d'infection est la viande de bœuf et que le micro-organisme peut passer du bœuf aux autres aliments par les ustensiles de cuisine. Comment ?

Cette question vient d'être réexplorée par Makiko Saito et Kumio Yokoigawa, à l'Université de Tokushima, à partir de cultures de diverses souches et d'échantillons de divers matériaux : acier inoxydable, titane, verre, aluminium, polymères... La souche P98, par exemple, s'attache mieux à l'acier inoxydable qu'au titane, et mieux au titane qu'au verre, mais elle s'attache très peu à l'aluminium ou aux matières plastiques.

À la surface de la viande, les micro-organismes ont accès au tissu collagénique qui gaine les fibres musculaires, mais aussi à la matière grasse et au sang, lequel contient notamment de l'eau et de l'albumine sérique (une protéine). Les biologistes ont testé certains détergents composés. L'albumine sérique ne modifie pas l'adhérence, mais la graisse réduit la contamination des matériaux testés (les micro-organismes ne se fixent pas sur les matériaux hydrophobes). Quand les surfaces sont lavées deux fois à l'eau chaude (60 °C), le nombre de bactéries fixées aux surfaces est similaire, et l'eau sans détergent est peu efficace.

La fixation pouvait-elle être indirecte et due à une association avec d'autres bactéries ? Les biologistes japonais ont étudié la protéine SliA du cytosol qui se lie aux lactones N-acyl-L-homosérine des bactéries Gram négatives (particulièrement nocives). La question était de savoir si la protéine bloquerait l'attachement aux divers matériaux. Les biologistes ont donc prétraité les surfaces

par immersion dans une solution de la protéine, puis mesuré la fixation des bactéries : le nombre de bactéries fixées n'était pas modifié. Le mécanisme de la fixation reste opaque.

Les cuisiniers savent maintenant que, pour *Escherichia coli* H157:H7, les ustensiles les plus sûrs sont les matières plastiques et l'aluminium. La matière grasse que l'on dépose à la cuillère sur les poêles de fer, afin d'empêcher leur oxydation, semble éviter l'adhérence de la bactérie... au prix d'un rancissement qui ne devait pas être de toute salubrité.

Toutes ces études confirment que manger cru, sans décontamination des ingrédients alimentaires, n'est pas un bon choix : le feu fait sans doute une innovation utile dans l'évolution humaine, parce qu'il tuait les micro-organismes... en plus de donner du goût. On n'oubliera pas non plus que les tests de contamination des appartements des citadins ont montré que les micro-organismes fleurissent dans les cuisines alors qu'ils sont absents des toilettes, où l'on n'hésite pas à utiliser des produits antibactériens efficaces. La volonté de protéger l'environnement en évitant l'eau de Javel et ses cousins est discutable !



Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique

Science & Culture Amnèsie de l'Académie des sciences



Retrouvez les articles de Hervé This sur [www.purlascience.fr](http://www.purlascience.fr)



## → ARCHÉOLOGIE

### On a retrouvé l'histoire de France

J.-P. Demoule

Robert Laffont, 2012  
(336 pages, 20,30 euros).

**V**oici un livre tout neuf qui fait du bien. J.-P. Demoule, professeur à l'Université de Paris I et directeur de l'Institut de recherche en archéologie préventive (INRAP) de sa fondation à 2008, est bien placé pour exprimer tout haut ce que beaucoup d'archéologues pensent tout bas : leur discipline a connu depuis 50 ans un développement extraordinaire sur l'Hexagone, à tel point que l'histoire nationale traditionnelle ne peut plus supporter les habits que lui avait taillés la III<sup>e</sup> République.

Un style direct et des accroches provocatrices interpellent le lecteur, le discours est large et bien construit. Dans une première partie intitulée « Au Gaulois inconnu », l'auteur réexamine l'histoire de France à la lumière des fouilles. « Ces leçons de l'archéologie » cherchent à définir ensuite comment l'analyse des vestiges matériels peut révéler le passé en lui-même, au-delà des discours

idéologiques qui le manipulent pour justifier notre vision du présent. L'auteur attire l'attention sur la Préhistoire et le haut Moyen Âge, dont l'enseignement est systématiquement écarté par les programmes officiels, au profit des « grandes civilisations » ou des mythes nationaux. Heureusement, la plupart des historiens actuels ont abandonné ces chimères, en s'intéressant comme les archéologues à tous les aspects de la vie quotidienne ou des mentalités à partir d'une analyse critique des textes.

Si la loi de 2001 a entériné les progrès de l'archéologie, le mouvement a commencé dès les années 1990 par le développement théorique de la discipline, la création d'enseignements, de recherches universitaires et d'un bureau au ministère de la Culture. En fait, le regard de notre société a changé : les témoignages des faits matériels, sources essentielles de l'archéologie, ont bousculé le règne de l'écrit.

Balotée par les idéologies contradictoires dans l'entre-deux-guerres, l'archéologie retrouve la vigueur qui lui avait permis au XIX<sup>e</sup> siècle d'ajouter des millénaires et des continents entiers à la mémoire de l'humanité. Les considérations de l'auteur sur l'évolution générale de l'humanité, de la violence ou de la religion, présentées sans une discussion suffisante, ne trouvent pas vraiment leur place ici. Mais cela n'empêche pas ce remarquable livre de montrer comment l'archéologie est capable aujourd'hui de faire resurgir certains traits du vécu réel de nos prédécesseurs et de corriger textes et discours par des faits indubitables.

→ Olivier Buchsenschutz

CNRS et Archéologie d'Orient et d'Occident, ENS

## → GÉOLOGIE

### Temps de la Terre, temps de l'Homme

Patrick De Wever

Albin Michel, 2012  
(240 pages, 20,30 euros).

**L**e temps est une notion qui nous échappe. Échappant à nos sens, nous ne pouvons l'estimer que par les vitesses des changements de notre environnement. Le temps nous semble élastique, fantasque et incontrôlable. Que nous soyons coupés des principaux stimulus environnementaux (en période de sommeil ou l'esprit concentré sur un sujet) et le temps passé nous semble étonnamment court. Et s'en rendre compte crée toujours un sentiment désagréable ? de perte de contrôle.

Quel temps passe vite en bonne compagnie, qu'il se traite en mauvaise... Nous avons donc de grandes difficultés à confronter notre perception du temps à l'échelle humaine. Comment alors pouvons-nous appréhender les millions d'années des temps géologiques ?

Patrick De Wever, géologue érudit et poète, disserte sur la moitié de l'ouvrage de cette difficulté d'estimer le temps passé avant de nous inviter à un voyage passionnant et passionné dans l'histoire des sciences. Il s'intéresse en particulier aux hommes forcés et assujettis aux cultures et aux sociétés de leurs époques qui, par leurs brêles philosophiques, mathématiques ou physiques, se sont intéressés aux temps de la Terre.

Aujourd'hui estimé à environ 4,56 milliards d'années, l'âge de la Terre a longtemps été décrété à 6000 ans, et ce jusqu'à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. Les progrès scientifiques (en thermodyna-



mique, stratigraphie, radiochronologie, etc.) ont petit à petit levé les voiles des dogmatismes principalement religieux. Il faut du temps à l'homme pour appréhender le temps.

Soyons francs, le défaut de ce livre est la couverture, et peut-être son titre. Froid et classique, il n'invite pas à le prendre en mains, le peur d'y voir surgir des formules de demi-vies isotopiques ou de cycles de Milankovitch. Une fois ouvert, le voyage est délicieux et instructif, complément idéal pour rendre attractifs et vivants les parfois austères manuels d'enseignement en géologie. Riche en anecdotes historiques, souvenirs personnels, émotions géologiques (quel étonnement que ces traces fossilisées de gouttes de pluie tombées il y a 260 millions d'années ou cette plage vieille de 460 millions d'années se confondant avec le sable de la plage de Camaret !), voilà un livre qui ravira les connaisseurs et fera apprécier la géologie même à ceux à qui elle semble dure comme la pierre.

→ Gaël Clément

Muséum national d'histoire naturelle, Paris



→ PHYSIQUE

**Voyage au cœur d'une bulle de champagne**

Gérard Liger-Belair et Guillaume Polidori

Odile Jacob, 2012  
(176 pages, 30,35 euros).

Une fine couche d'arsenic au-dessus d'un liquide, c'est un petit bijou. Ce livre aussi : je l'ai déjà offert à plusieurs de mes proches ; mes collègues physiciens s'arrachent mon exemplaire, et font aussi l'adeau du livre à tous les amateurs de bulles qui leur sont proches... Il y a plusieurs raisons à cela. Tout d'abord, ce livre est beau : les photographies sont spectaculaires, soignées et les résultats obtenus par l'utilisation de nouvelles techniques comme la tomographie laser sont surprenants. Outre les prouesses techniques qui suppose cette réalisation, ces images contribuent à la compréhension du phénomène d'effervescence. La course des trains de bulles dans une flûte produit en effet des phénomènes aussi beaux que spectaculaires.



Ensuite, le texte est captivant. Les auteurs expliquent de façon ludique la science des bulles. Ils décrivent les phénomènes complexes qui se jouent à l'échelle d'une flûte de champagne.

d'une coupe de champagne est donc entièrement exploité : turbulence, physico-chimie des interfaces, catalyse... L'ouvrage aborde tout à tour l'alchimie inattendue des tensioactifs, les instabilités capillaires de sillage, le rôle des graisses du rouge à lèvres, la formation de radeaux de bulles et même de fleurs de surface. On apprend pourquoi il est préférable de boire le champagne dans des flûtes plutôt que dans des coupes, et qu'il faut éviter les gobelets en plastique. Les auteurs éclairent la composition du raffiné breuvage, de la présence du dioxyde de carbone en passant par les impuretés, et jusqu'aux tailles des bulles. Nous apprendons ainsi que les bulles se forment essentiellement sur des impuretés, comme des petites fibres croisées de chiffon, et non sur les imperfections du verre. La manière dont les bulles se libèrent et dont elles circulent dans le verre, mais aussi la façon dont elles explosent en surface, tout cela influe sur l'équilibre du breuvage. Il y en a jusqu'à deux millions par verre de champagne, qui mettent le liquide en mouvement. Grâce à ses bulles, le champagne est donc un vin remuant qui brasse les molécules aromatiques volatiles vers la surface, et les libère à la faveur de micro-explosions. Ce qui semble un pétillerium délicat se révèle au microscope une véritable éruption de mousse de gouttelettes et de particules aromatiques.

L'histoire même du champagne, brièvement évoquée, est rocambolesque : elle mêle intrigues de cours, aléas climatiques, poids de l'Église, rivalités européennes... Bref, tout ce qu'il faut pour faire une bonne recette, comme celle d'origine du champagne et de ce livre...

→ Christophe Pichon

Institut d'astrophysique de Paris

→ ORNITHOLOGIE

**100 oiseaux rares et menacés de France**

F. Jiguet

Delachaux, 8 Mars 2014, 2014  
(222 pages, 24 euros).

Chef de file au Muséum de Paris, l'auteur est le directeur du Centre de recherche sur la biologie des populations d'oiseaux. Pour réaliser ce bel ouvrage illustré, il a par ailleurs bénéficié de l'aide de la Ligue de protection des oiseaux et d'autres



organismes, que cette protection concerne. En effet, son objectif est d'insister sur les espèces menacées, même encore fréquentes, qui pourraient disparaître à cause de la pression anthropique.

À cette fin, il nous offre une introduction du propos et une conclusion solidement argumentées, dans lesquelles il rappelle la diversité des menaces qui pèsent sur les oiseaux. L'évolution de l'habitat de plus en plus fragmenté, le changement climatique sont les premières évoquées. Dans un pays comme la France, la chasse arrive aussi en tête des menaces. D'une part, les espèces protégées sont dérangées par les chasseurs et, d'autre part, leur prédation menace directement des

**MUR D'IMAGES**

J.-D. Baudouin  
Errance, 2012  
(314 pages, 39 euros).

Le Sahara est un vaste musée, où des milliers de peintures et de gravures néolithiques sont exposées à ciel ouvert depuis plus de 5 000 ans. Voici celles que l'auteur, ethnologue et cinéaste, a fait relever en 1960 et 1961 au Tassili et qu'en 2009, il est allé confronter à celles du Sahara préhistorique. Il y récapitule tout ce que l'on sait en France sur l'art pariétal du Tassili et le Sahara.

**VILLES SOUS CONTRÔLE**

Stephen Graham  
La Découverte, 2012  
(200 pages, 22 euros).

La guerre est entrée dans la ville. Le saviez-vous ? Géographe à l'Université de Newcastle en Angleterre, l'auteur attire notre attention sur un phénomène historiquement insidieux (Algérie, Irlande, Israël, Bosnie, Iraq, Syrie...) : les armées régulières employées pour venir faire en ville une police d'État (les *kill squads*) brutales (Iraq). La mondialisation est en marche : voici une pertinente analyse de l'une des plus inquiétantes facettes...

**QUAND LA MÉDECINE GAGNE**

P. Berthelot, J.-J. Lefrère  
Flammarion, 2012  
(340 pages, 14 euros).

Les grands progrès médicaux ont souvent été le fait de praticiens observateurs et tenaces. Les auteurs, tous deux professeurs de médecine, leur rendent hommage en racontant leurs aventures intellectuelles. Les récits qui en résultent sont très divers, mais toujours passionnants.

## ESPÈCES INVASIVES

Wolfgang Muntwiler  
PPUR, 2012 (44 pages, 13,50 euros).



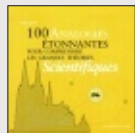
**P**ourquoi et comment lutter contre les espèces invasives ? C'est ce qu'explique pas à pas ce petit livre documenté. Avec les échanges mondiaux, de nombreuses espèces traversent les océans. Leur multiplication se fait aux dépens des écosystèmes envahis, nuisant à la biodiversité, à l'agriculture, voire à la santé. Professeur d'écologie, l'auteur appelle à une réglementation à l'échelle européenne, car il est moins coûteux de prévenir que d'éradiquer.

## CES PETITS HASARDS QUI BOULEVERSENT LA SCIENCE

Marie-Noëlle Charles  
Le Papillon rouge, 2012  
(286 pages, 10,50 euros).



**D**errière le titre un peu provocateur se cachent 50 découvertes scientifiques où le hasard a joué un rôle certain. L'anesthésie, le VCR, le four à micro-ondes, le stéthoscope, le fil de suture, les enlèvements, on prend toute la mesure de la phrase de Louis Pasteur : « Le hasard ne favorise que les esprits préparés. »



## 100 ANALOGIES ÉTONNANTES POUR COMPRENDRE LES GRANDES THÉORIES SCIENTIFIQUES

Joel Levy  
Le Courrier du Livre, 2012  
(224 pages, 7 euros).

**S**i l'histoire de la Terre était comprimée en un seul jour, les dinosaures seraient apparus à 22h46 et notre espèce, trois secondes avant minuit. Par de nombreuses analogies, l'auteur propose une introduction intuitive aux sciences. Ces analogies ont certes leurs limites, mais attisent la curiosité...

espèces telles que l'oie cendrée ou l'ortolan. Quelques couples d'oies cendrées sont nicheurs à l'année, mais comme des milliers de migrants arrivent de Scandinavie en octobre, la loi autorise leur chasse. Or, la chasse débutant en septembre, les oies locales sont les premières tirées.

L'ortolan est encore plus dramatique. Bien que la chasse en soit interdite, un braconnage traditionnel perdure dans le Sud-Ouest qui condamne l'espèce à la disparition dans quelques années. D'autres menaces comme la pollution, les collisions, l'hybridation avec des espèces domestiques ou introduites sont aussi évoquées. Le propos n'est pas uniquement pessimiste, car quelques pistes pour répondre aux menaces sont évoquées. Afin d'évaluer précisément le degré de menace pour une espèce, l'auteur se fonde sur la liste rouge de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), qui a élaboré huit catégories. Très lisible, la fiche de chaque espèce établit à chaque fois l'identification, l'habitat et la distribution, le statut et l'historique des menaces. La diversité des photos donne à voir des oiseaux dans leur environnement, au regard de leur allure exotique, on pourrait douter de la présence en France métropolitaine ; en est ainsi du ganga cata, de l'églon blanc ou de l'outarde canepetière.

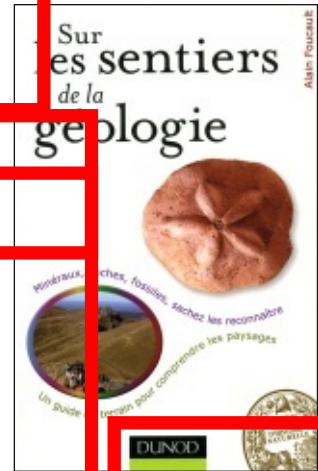
Enfin, on peut se demander si les 100 espèces mentionnées dans le titre le sont pour marquer les esprits ou parce que cela correspond à une réalité. Quoi qu'il en soit, l'historique hélas de se rallonger. Souhaitons que les connaissances précises apportées par ce livre contribuent à asseoir une protection durable de qualité.

→ Farid Benhammou

## → GÉOLOGIE

### Sur les sentiers de la géologie

Alain Foucault  
Dunod, 2012 (192 pages, 15,90 euros).



**C**ertaines sciences ne sont pas à la portée des amateurs. On ne voit pas bien comment s'adonner à la physique des particules dans son garage ou à la biologie moléculaire dans sa cuisine. D'autres disciplines, plus « naturalistes », sont plus accessibles, et la géologie en fait partie. Même si les géologues modernes utilisent volontiers des équipements coûteux tels que spectromètres ou microscopes électroniques, les études sur le terrain restent un des points de départ de la recherche géologique, et c'est essentiellement en allant chercher dans les roches et des fossiles dans la nature que l'amateur peut encore s'adonner à leur étude.

Encore faut-il pour cela posséder quelques bases, et ce livre est destiné à les fournir. Contrairement à d'autres guides s'adressant au grand public, cet ouvrage n'est pas un simple catalogue de roches, minéraux et fossiles, destiné avant tout aux collectionneurs. Comme l'écrit très justement Alain Foucault au sujet des fossiles : « Il ne faut pas se faire trop d'illusions sur la possibilité de trouver le bon nom d'espèce : c'est là, bien souvent, une affaire de spécialiste, bien au-delà des compétences de l'amateur. » Les photographies de spécimens minéralogiques, pétrographiques et paléontologiques qui agrémentent le livre sont là pour per-

mettre des identifications très générales, ou pour mettre un nom sur tous les spécimens susceptibles d'être découverts par l'amateur au cours de ses excursions. Explications et illustrations à l'appui, l'auteur aide d'ailleurs le lecteur à ne pas se cantonner à la récolte de « cailloux », mais à tenter de comprendre les structures géologiques qu'il pourra rencontrer : interpréter un paysage peut être tout aussi enrichissant pour l'esprit qu'accumuler des objets. Le chapitre intitulé « Explorer la France » est à cet égard fort bien venu. En présentant les grandes régions géologiques du sol français, il aide le lecteur à s'orienter et à savoir ce qu'il peut espérer découvrir en fonction de l'endroit où se porteront ses pas (ou sa voiture). Une brève bibliographie, une liste de musées et un aperçu sur les ressources Internet disponibles complètent ce bel ouvrage.

→ Eric Buffetaut

CNRS, Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur :

[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)