

■ POUR LA SCIENCE

Juillet 2009 - n° 381

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Jouer...

Les stratégies optimales
pour s'arrêter au bon moment

Thon rouge

Comment le sauver ?

Cratères météoritiques

Les traces géologiques
des impacts

Floraison

Le rôle crucial du froid
et de la longueur des jours



M 0 687 - 381 - F: 6,20 €



France métro : 6,20 € - DOM : 7,30 € - BEL : 7,20 € - CH : 12 FS - CAN : 9,45 \$ - LUX : 7,20 €
Italie : 7,20 € - PORT : 7,20 € AND : 6,20 € - ALL : 9,30 € - MAR : 57 dh - REU : 9,30 € - TOM surface : 980 XPF - TOM Avion : 1770 XPF

Assurance auto : roulez vert et moins cher ! ...

Modifier ses comportements pour préserver l'environnement devient une nécessité. Et en matière de transports, on peut faire beaucoup... La GMF encourage les initiatives par des tarifs très attractifs.

On assiste à des changements de comportements durables des automobilistes français : 56% affirment rouler moins vite pour consommer moins de carburant, 39% disent moins utiliser leur voiture ⁽¹⁾. Apparition de voitures hybrides, biocarburants, promotion du concept d'éco-conduite pour utiliser moins d'essence... Beaucoup plus qu'une mode, « l'écologie au volant » s'accompagne d'incitations fortes de la part des pouvoirs publics, comme en témoigne la mise en place, fin 2007, du bonus écologique.

ÉCOLOGIE ET ÉCONOMIES

Afin de soutenir ces comportements citoyens sur la route, la GMF a conçu AUTO PASS, un contrat d'assurance doté de garanties innovantes, à des



Serac Communication - Photo Getty Images

Marc Tellier, spécialiste auto à la GMF « les + qui vous font gagner de l'argent »

« A la GMF, nous sommes bien conscients que les modes de vie ont évolué et que les comportements en matière de transports ont changé... Nous en avons tenu compte en concevant notre produit AUTO PASS. Avec le tarif ECO PASS, les usagers des transports en commun bénéficient d'une réduction de 10% sur leur cotisation ⁽²⁾. Cette réduction, ils peuvent la cumuler avec le tarif Bio Bonus, soit -5% supplémentaires pour les propriétaires de véhicules propres ⁽³⁾. Enfin, les petits rouleurs ne sont pas oubliés : ils profitent d'une ristourne de 10% sur leur prime s'ils font moins de 5 000 km par an en usage privé avec leur véhicule. Ajoutons que ces réductions s'effectuent sur la totalité de la cotisation, et non sur la seule responsabilité civile, comme cela arrive souvent... ».

tarifs adaptés à ces nouveaux usages. Petits rouleurs, utilisateurs des transports en commun et conducteurs de véhicules propres bénéficient de réductions significatives sur leur prime d'assurance. Au total, il est possible de vraiment réduire son budget assurance auto.

Economies d'énergie et mesures en faveur de l'écologie riment souvent avec maintien du pouvoir d'achat. C'est le cas à la GMF !

LE BONUS ÉCOLOGIQUE : COMMENT ÇA MARCHE ?

Le bonus écologique est l'une des incitations aux économies d'énergie lancées par les pouvoirs publics. Il est fondé sur les émissions de CO₂ des véhicules neufs :

- L'acquéreur d'un véhicule propre, c'est-à-dire qui émet moins de 130 grammes de CO₂ au km (soit environ 45% des ventes de voitures en 2008), peut percevoir, selon le type de voiture, de 200 à 5 000 € de bonus. Si, de plus, il met à la casse une auto de plus de 10 ans, il peut prétendre au super bonus de 1 000 € ⁽⁴⁾.

- A contrario, les achats de véhicules polluants (plus de 160 grammes de CO₂/km) sont pénalisés jusqu'à 2 600 €.



(1) source : Union française des industries pétrolières.

(2) sur présentation pour le conducteur principal (ni étudiant, ni lycéen) d'un abonnement annuel payant.

(3) véhicules de moins de 5 ans émettant moins de 120 g CO₂/km.

(4) depuis le 4/12/2008 et jusqu'à fin 2009, sauf disposition contraire.

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

POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction - Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Pour la Science :

Rédacteur en chef adjoint : Maurice Mashaal
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe,
Bénédicte Samun-Lassalle, Jean-Jacques Perrier

Dossiers Pour la Science :

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Rédacteur : Guillaume Jacquemont

Génies de la science :

Rédactrice : Marie-Neige Cordonnier

Cerveau & Psycho :

Rédacteur : Sébastien Bohler

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet,
Sylvie Sobelmann, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy,
Pascale Thiolliez-Dumartin

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe

Marketing : Philippe Rolland, assisté de Heidi Chappes

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Marianne Sigogne
et Emmanuelle Feuillu.

Presse et communication : Susan Mackie

Directeur de la publication et Gérant : Marie-Claude Brossollet

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Francis Albarede, Nadine Binart, Thomas Bruss, Édouard
Gentaz, Évelyne Host-Platret, Michael King, Delphine Oudiette,
Guy Perrière, Christophe Pichon, Daniel Tacquenet, Bernard
Thierry, Alain...

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
(jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk
Tél. : 01 55 42 84 00 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémion. Tél. : 01 55 42 84 04

Abonnements pour la Belgique : EDIGROUP Belgique Sprl- 5 place du
Champs de Mars - 20th floor - 1050 Bruxelles - tel 070/233 304 - abo-
belgique@edigroup.be

Abonnements pour l'étranger : Edigroupe - 30 rue de la Chapelle - 93100
Chene Bourg - France - Tél. : 022/860 84 01 - abonne@edigroup.ch

Commande de dossiers ou de magazines :
08 92 68 11 40 (de l'étranger, (+33) 2 37 82 06 62)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Canada : Edigroupe - 30 rue de la Chapelle - 93100 Chene Bourg - France
Québec, H3N 1V3 Canada.
Suisse : Servidit - Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Chapelle - 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief: John Rennie. Editors: Mariette
Di-Christina, Ricki Rusting, Philip Yam, Gary Stix, Mark Alpert, Steven
Ashley, Peter Brown, Graham Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky,
George Musser, Christine Soares, Kate Wong.
President : Steven Yee. Managing Director, International :
Kevin Hause. Vice President : Frances Newburg.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public
français ou francophone, les textes, les photos, les dessins
ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science »,
dans la revue « Scientific American », dans les livres édi-
tés par « Pour la Science » doivent être adressées par
écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction,
d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque
et le nom commercial « Pour la Science » sont des marques de la Scientific
American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire inté-
gralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur
ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-
Augustins - 75006 Paris).

de **Françoise Pétry** rédactrice en chef

Choix optimisé

Comment choisir ? Peut-on même choisir ? Quelles sont les motivations qui guident les choix ? À trop réfléchir, ne risque-t-on pas de ne rien décider ? Faut-il étudier les diverses options pour décider en conscience, ou s'en remettre au hasard, à l'intuition ? Ou suivre le choix des autres, comme le suggère Montaigne dans les *Essais* : « Puisque je ne suis pas capable de choisir, je prends le choix d'autrui. » ?

C'est une question omniprésente dans la vie quotidienne, mais aussi en science. Les scientifiques s'en préoccupent et donnent des pistes pour y répondre. Les mathématiciens se penchent sur la façon de partager des richesses, sans mécontenter personne (*voir La répartition idéale des biens existe-t-elle ?*, page 88). S'inspirant du jugement de Salomon, ils tentent de résoudre par le calcul le dilemme auquel le sage a été confronté : deviner quelle était la vraie mère parmi deux femmes qui se disputaient le même enfant. Or ce servait qu'en décidant que l'enfant serait coupé en deux, il a reconnu la mère : celle qui demanda que le petit soit donné à l'autre femme afin de lui sauver la vie.

Les stratégies d'arrêt optimal s'appliquent à de multiples domaines.

Comment optimiser ses gains aux jeux de hasard ? Selon les mathématiciens – encore –, en s'arrêtant au bon moment (*voir Savoir quand s'arrêter*, page 24). Les stratégies d'arrêt optimal s'appliquent à de multiples domaines : les marchés boursiers, l'évaluation des options financières (on s'interroge : les modèles sont-ils à parfaire ou n'ont-ils pas été appliqués lors de la récente crise ?), ou encore l'exploitation des ressources pétrolières.

A priori, les stratégies d'arrêt optimal n'ont pas (pas encore ?) été appliquées à la question de la gestion du stock de thon rouge, surexploité (*voir Menaces sur le thon rouge*, page 32). Mais elles pourraient aider les épidémiologistes et les médecins qui surveillent les infections chez les animaux sauvages et les populations en contact avec eux : elles leur permettraient peut-être de décider si un nouveau micro-organisme pathogène risque de déclencher une épidémie et, par conséquent, à quel moment il faut cesser d'attendre et mettre en place les mesures sanitaires appropriées (*voir Comment éviter la prochaine pandémie ?*, page 52).

Les stratégies d'arrêt optimal semblent contredire Marcel Proust qui prétendait dans *Albertine disparue* que, « dès qu'il y a un choix, il peut être que mauvais ».

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES
Didier Nardon

Actualités

6 L'entriction gagne du terrain

7 Réfléchir sans y penser

8 Les fientes de manchots
recréditées par satellite9 Le code cérébral
des émotions vocales12 Infertilité féminine :
deux molécules identifiées

...et bien d'autres sujets

13 ON EN REPARLE

Opinions

14 POINT DE VUE

Pour une égyptologie
égyptienne

Guillaume de Andreu-Lanoë

15 ÉCONOMIE

Le patron est-il dépassé ?

Ivar Ekeland

16 DÉVELOPPEMENT DURABLE

Le prix de la biodiversité

Bernard Chevassus-au-Louis

18 QUESTIONS OUVERTES

Les essais cliniques :
pourquoi sont-ils
aujourd'hui critiqués ?

Simone Bateman

Les essais cliniques soulèvent
des problèmes éthiques.Les médecins sont parfois tiraillés
entre leur obligation de soins
et leur volonté de tester
de possibles traitements.

22 VRAI OU FAUX

L'éléphant a-t-il
une bonne mémoire ?

Bénédicte Salthun-Lassalle

23 COURRIER DES LECTEURS

24 MATHÉMATIQUES

Savoir
QUAND
s'arrêter

Theodore Hill

Dans les jeux de hasard, les mathématiques indiquent parfois quel est le meilleur moment pour s'arrêter de jouer. Ces stratégies d'arrêt optimal s'appliquent aussi dans d'autres situations.

32 ENVIRONNEMENT
Menaces sur le thon rouge

Alain Fonteneau et Jean-Marc Fromentin

Surtout pêché pour les marchés japonais du sushi, le plus grand des thons est victime de son succès et est fortement surexploité.

40 GÉOLOGIE
Les cratères de météorites

Pierre Vincent

Les cratères d'impacts météoriques sont produits par des explosions, qui laissent des signatures géologiques et minéralogiques caractéristiques.

48 Forage dans le plus grand
cratère américain

Christian Koeberl

Il y a 35 millions d'années, une météorite de plusieurs kilomètres de diamètre a explosé dans la mer continentale de Virginie. L'astrolème marin ainsi créé est l'un des mieux conservés du monde.

52 MÉDECINE

Comment éviter la prochaine pandémie ?

Nathan Wolfe

Un réseau international surveillant les transferts de virus entre les animaux et l'homme permettrait de prévenir les prochaines grandes épidémies.

58 NANOTECHNOLOGIES

La propulsion des nanomoteurs

Thomas Mallouk et Ayusman Sen

Des moteurs catalytiques qui utilisent le fluide environnant comme combustible propulsent aujourd'hui des robots microscopiques. Ils ouvrent la voie à de nombreuses applications.

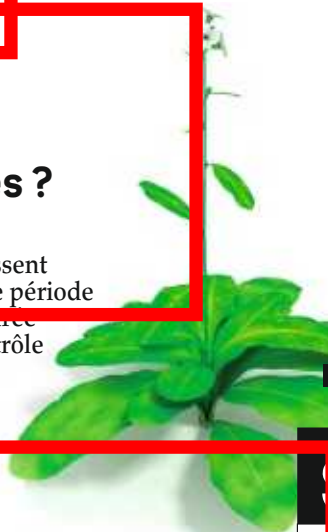


66 BIOLOGIE VÉGÉTALE

Mais qu'est-ce qui fait fleurir les plantes ?

François Parcy

De nombreuses plantes ne fleurissent qu'après avoir été soumises à une période de froid et quand le jour a une durée adaptée. Les mécanismes du contrôle de la floraison sont désormais étudiés à l'échelle moléculaire.



74 BIOLOGIE

Vivre dans des milieux hypersalés

Shiladitya DasSarma

Depuis des centaines de millions d'années, les haloarchées, des micro-organismes unicellulaires, vivent dans des milieux parfois dix fois plus salés que l'eau de mer !



Regards

80 LES LIMITES DE LA SCIENCE

Qu'en dira la planète : quelles limites ?

Entretien avec Hervé Guyomard

84 HISTOIRE DES SCIENCES

Mary Anning et les débuts de la paléontologie anglaise

Alexis Dahan

88 LOGIQUE & CALCUL

La répartition idéale des biens existe-t-elle ?

J.-P. Delahaye et Ph. Mathieu

94 ART & SCIENCE

Une pharmacopée du Prévert

Loïc Mangin

96 IDÉES DE PHYSIQUE

Jeux de boules creuses multiples

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

99 SCIENCES & GASTRONOMIE

La cuisine note à note

Hervé This

100 SAVOIR TECHNIQUE

Les lampes fluorescentes compactes

François Savatier

102 À LIRE

SCIENCE.fr

Sur www.pourlascience.fr

PLUS D'INFORMATIONS

- » Retrouvez l'intégralité de votre magazine en ligne
- » Découvrez l'actualité scientifique au quotidien
- » Recherchez les articles qui vous intéressent
- » Visitez notre banque d'images

À VOUS LA PAROLE

- » Réagissez aux articles publiés
- » Posez vos questions à nos experts

LES SERVICES EN LIGNE

- » Consultez nos offres d'emploi
- » Abonnez-vous et gerez vos abonnements en ligne

→ **MATIÈRE GRISE INFOS**

Les grands de ce monde sont guidés par les mêmes aléas de la vie que nous tous. Ce sujet constant d'étonnement et de philosophie à deux sous permet à quelques magazines de connaître d'enviables tirages. Toutefois, ces magazines ne s'intéressent guère qu'aux têtes couronnées. Ils laissent libre le créneau représenté par les autres grands de ce monde que sont les champions de la matière grise. Je propose donc de lancer une revue qui pourrait s'appeler *Matière grise Infos*. Un numéro typique se présenterait comme suit.

Elle passe par le vide-ordures la médaille Fields de son mari ! Détails pourrants sur la mésaventure entre Monsieur X et son épouse. Accusations réciproques. « Depuis qu'il a eu la médaille Fields, il se croit dis-

prédéceseur. Dans la brillante assistance, nul ne sait encore qu'il est atteint d'un cancer incurable. Il n'a informé que sa femme, par ces mots simples et bouleversants : « Je ne saurai pas longtemps immortel. »

Holoscope (extraits). Poissons. Travail. Vos collègues essaieront de prendre toute la gloire pour eux. *Santé. Soignez vos vieux paradigmes. Vierge. Travail.* Le paradigme sur lequel vous pourrez bâtir une carrière surgira de façon inopinée. Ne laissez pas passer la chance ! *Amour.* N'idéalisez pas votre patron de thèse. *Santé.* N'abusez pas des épistémologues américains.

Le monde n'éprouve aucun remords. Photo du professeur K, solidement encadré par des policiers. Sa sauvagerie inouïe. Son intelligence démoniaque. Le couteau ensanglanté. Vingt-sept coups à son rival. Il ne regrette rien. Photo de la victime, souriante. « Dans deux heures, le professeur L tombera dans l'embuscade machiavélique que lui a tendue le professeur K. » La jalousie à l'origine du drame. Le professeur L avait obtenu une nomination que le professeur K estimait lui être due. Débat avec nos invités de la semaine : « Peut-on tuer pour un poste ? »

Enfin, comme il ne faut pas désespérer l'intelligentsia, le dernier article de *Matière grise Infos* sera toujours optimiste. Exemple : *Amour auquel ils ne croyaient plus les attendait à Stockholm.* Monsieur W, vieux garçon venu à Stockholm pour y recevoir le prix Nobel de chimie, rencontre, lors de la cérémonie de remise, Madame Z, veuve éplorée, lauréate du prix Nobel de physique. Coup de foudre réciproque. Projets d'avenir. Bientôt un enfant ?

Les bureaucrates sont impressionnés par les plus brillants d'entre eux, qui réussissent à maîtriser les dossiers les plus complexes et les plus épais. Ceux-là ne possèdent pas seulement une mémoire fabuleuse et des techniques d'apprentissage éprouvées, ils jouissent aussi d'une faculté de travail phénoménale.

Des années après son retrait, les mathématiciens parlent encore avec ferveur de Grothendieck, qui (de nombreux témoignages concordent) avait l'habitude de travailler 25 heures par jour.

Ainsi, l'incroyable moyen, le bureaucrate de base, le mathématicien ordinaire, se ressemblent sur un point : ce qui les subjuguait, chez les vedettes de leur spécialité, ce ne sont pas seulement leurs dons exceptionnels ; c'est aussi leur aptitude à travailler sans repos. Comment expliquer que des gens aussi différents partagent un même éblouissement devant l'acharnement au travail ? C'est qu'ils se sentent légitimés par le fait que de nombreux individus extrêmement doués vouent tout leur temps à la même activité qu'eux. Exalte ces travailleurs surpuissants revient à exalter l'activité dans laquelle ils s'illustrent. Cela dispense de se poser des questions existentielles, parfois dérangeantes, sur le sens et la valeur de cette activité. Si elle n'était pas un accomplissement humain supérieur, nul ne la jugerait digne qu'il s'y consacre jour et nuit, n'est-ce pas ? La simple existence des gros bosseurs prouve qu'elle a toutes les raisons d'être.

Le monde est fasciné par les bourreaux de travail, aveugles et sourds à ce qui ne s'insère pas dans leur cadre. Il n'y a rien là pour réjouir.



pensé de tout soin du ménage. » « Elle m'empêche de me concentrer par ses intrusions incessantes dans mon bureau. » Puis la dispute fatale. Monsieur envoie une assiette à la figure de Madame, laquelle se venge en jetant la médaille de Monsieur.

Sa femme est seule à connaître l'horrible vérité. Sans rien laisser paraître de la tragique nouvelle qu'il a apprise le jour même de son élection, l'écrivain A. de D. prononce, devant l'Académie française, l'éloge de son

→ **TRAVAILLEZ, PRENEZ VOTRE PEINE...**

Les chercheurs les plus renommés ne sont pas devant ceux d'entre eux qui, capables de supporter d'énormes charges de travail, s'entraînent plus longtemps et plus durement que leurs concurrents par tous les temps, même quand ils sont malades ou blessés, et, à force de volonté, se construisent un palmarès supérieur.



→ UN SENS COMMUN SANS FIN

Le sens commun est un concept d'infini qui a un potentiel, c'est-à-dire inaccessible. Les mathématiciens, eux, manient depuis un siècle l'infini actuel, c'est-à-dire réalisé, atteint : ils considèrent que les ensembles infinis ont une existence pleine et entière. Si belle et puissante soit leur théorie de l'infini actuel, affirmons pourtant, au risque de les indigner, que quelque chose ne va pas dans le fait d'agir comme si l'infini était accessible.

Manier l'infini actuel a conduit les mathématiciens à démontrer qu'il existe toutes sortes d'infinis différents. Ils y suivent une formulation hâtive mais parlante, une infinité d'infinis, de plus en plus grands. Pour le sens commun (lequel, en l'occurrence, est



partagé par tout ce que la Terre compte comme sagesse... à l'exception des mathématiciens), pour le sens commun, l'idée d'une infinité d'infinis paraît pire qu'incompréhensible : carrément absurde.

Il se pourrait que les automates cellulaires offrent une issue nouvelle. Certains commentateurs, en effet, espèrent que ces automates vont suffire à modéliser l'espace et le temps. On n'aurait plus besoin du continu pour ce faire. Or le continu est la principale source, sinon la raison d'être, de la théorie de l'infini actuel. Rêvons alors d'un programme : réussir à se passer de l'hypothèse de l'infini actuel sans amputer gravement les mathématiques pour autant.

Je ne doute pas qu'aux yeux des mathématiciens un tel programme paraîtra pire qu'absurde : carrément farfelu. Eh bien, plus têtue d'eux, je maintiens qu'ils ont tort de passer outre cette lacune du sens commun : l'infini n'est pas à portée humaine. L'homme ne peut pas faire de l'infini un objet maniable.

IRD
Éditions

Institut de recherche
pour le développement

Salon du Livre de Paris
13 - 18 mars 2009

Un éditeur
pour le
développement

www.ird.fr

IRD Éditions
Stand Z 25



**Aires protégées,
espaces durables ?**

C. AUBERTIN, E. RODARY
260 p.
978-2-7099-1651-6
Prix TTC : 25 €



**Le trachome. Une
maladie de la
pauvreté**

J.-F. SCHEMANN
280 p.
978-2-7099-1-1648-2
Prix TTC : 35 €



**Ouagadougou
(1850-2004)
Une urbanisation
différenciée**

F. FOURNET,
A. MEUNIER-NIKIEMA,
G. SALEM
144 p.
978-2-7099-1657-8
Prix TTC : 42 €



**Démarche qualité et
norme ISO 9001**

E. GIESEN
178 p.
978-2-7099-1631-8
Prix TTC : 32 €

En vente dans toutes les librairies
et points de vente IRD.

Par correspondance (VPC) :

IRD Diffusion

32 av. Henri Varagnat - F 93143 Bondy cedex
Tél. : 01 48 02 56 49 - Fax : 01 48 02 79 09
diffusion@bondy.ird.fr

Physique

L'intrication gagne du terrain

L'ingénierie quantique étend son emprise : pour la première fois, des physiciens ont créé des états intriqués à partir des vibrations de deux paires d'ions.

En physique quantique, un état intriqué de deux objets est tel qu'une mesure effectuée sur l'un des objets influe fortement sur l'état de l'autre objet, quel que soit l'éloignement des deux objets. L'intrication d'états est, avec la superposition d'états,

une des particularités les plus troublantes du monde quantique. Depuis une quinzaine d'années, les physiciens obtiennent des états intriqués en manipulant tout des états internes d'atomes ou des photons. John Jost, à l'Institut américain des étalons et de la tech-

nologie (NIST, à Boulder dans le Colorado) et ses collègues ont innové en obtenant l'intrication des états vibrationnels de deux oscillateurs mécaniques : deux paires d'ions positifs écartées d'environ un quart de millimètre, distance assez grande pour que l'interaction entre paires soit négligeable.

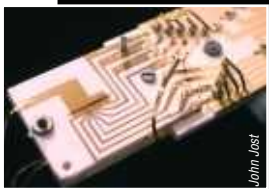
Chaque paire comporte un ion de béryllium (Be^+) et un ion de magnésium (Mg^+), maintenus proches grâce à un piège électromagnétique (un « piège de Paul »). En raison de la répulsion électrostatique entre les ions, la paire oscille : elle se comporte comme un système de deux masses reliées par un ressort long d'environ quatre micromètres.

Les états quantiques de vibration d'un tel oscillateur sont bien connus. Restait à intriquer quantiquement les deux oscillateurs, c'est-à-dire à rendre leurs mouvements de vibration intimement liés. L'équipe de J. Jost l'a fait en recourant à un jeu complexe de séries d'impulsions laser et de champs électriques, permettant d'initialiser et de positionner correctement les ions, et de manipuler les états vibrationnels des deux paires.

Les techniques et procédures mises au point par ces physiciens constituent un nouvel outil pour créer et manipuler des systèmes quantiques originaux. On peut songer à de nombreuses applications au traitement quantique de l'information. Mais il s'agit surtout de recherche fondamentale, pour explorer plus avant le monde quantique, notamment la possibilité d'intriquer des systèmes microscopiques qui, de rares exceptions près, se comportent suivant les lois de la physique classique.

Ce champ de recherche, le premier de le mettre en avant en attribuant sa médaille d'or de 2009 à Serge Haroche, du Laboratoire Kastler-Brossel à Paris. Pour commencer de l'étude des interactions atomes-photons dans une cavité ultraréfléchissante, qui explore notamment la frontière entre le monde quantique et le monde classique, l'intrication est familière. L'un de ses prochains objectifs est d'obtenir l'intrication quantique de systèmes atomes-photons dans deux cavités distinctes.

J. Jost et al., *Nature*, vol. 459, pp. 683-686, 2009.



1



Une vue d'artiste d'un système de deux paires d'ions (Mg^+ - Be^+) dans un état quantique intriqué de leurs vibrations. Les flèches désignent l'état interne des ions beryllium, que les expérimentateurs ont manipulé afin d'obtenir l'état intriqué désiré. Le nuage violet symbolise l'intrication des deux oscillateurs. Les électrodes sont fixées sur un support en aluminium.

UN HOMINIDÉ DE 12 MILLIONS D'ANNÉES

Des chercheurs de l'Université de Barcelone ont découvert une nouvelle espèce d'hominidé qui vivait il y a 12 millions d'années. *Anoiapithecus brevirostris*, pour le moment connu seulement par sa face et sa mâchoire, a été mis au jour au lieu-dit d'Abocador de Can Mata. Il est peu prognathe (ses maxillaires sont peu proéminents), cette caractéristique n'a d'équivalent, parmi les hominidés, que dans le genre *Homo*. Il pourrait livrer des indices sur l'origine de l'homme des hominidés.

DU MAÏ SURVITAMINÉ

Une équipe germano-espagnole annonce la création d'une variété de maïs transgénique enrichie en trois vitamines. Par rapport à une variété courante, elle contient 16 fois plus de bêta-carotène, six fois plus de vitamine B₆ et deux fois plus d'acide folique (vitamine B₉). Pour la première fois, les chercheurs ont modifié simultanément trois voies métaboliques distinctes. Selon eux, leur méthode dépasse de loin les possibilités de l'amélioration par croisement classique.

ANTIGEL MARTIEN

L'eau liquide était présente en quantité sur Mars, quand la planète était jeune. Mais la température y était devenue très basse. Comment dès lors l'eau a-t-elle pu rester liquide ? À cause du sel, proposent des chercheurs de la NASA. Ils ont modélisé l'évolution du point de fusion de l'eau quand y sont dissous des sels minéraux issus de l'érosion de roches basaltiques typiques de Mars. Résultat : cette eau salée reste liquide à des températures compatibles avec celles ayant régné sur Mars.

Psychologie

Réfléchir sans y penser

Rêvasser permettrait de résoudre des tâches cognitives complexes.

« Rêvasser », c'est-à-dire laisser son esprit vagabonder quand on est éveillé, stimule l'activité du cerveau, ce qui permettrait de résoudre les problèmes complexes. C'est ce que montrent les travaux de Kalina Christoff, du Département de psychologie de l'Université de Colombie-Britannique à Vancouver (Canada), et ses collègues.

Les psychologues ont placé 15 étudiants dans des appareils d'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique et ils ont enregistré l'activité de leur cerveau quand ils réalisaient une tâche simple devant rapidement automatisée – par exemple appuyer sur un bouton, peu qu'ils le savaient. Ils ont constaté que le réseau cérébral par défaut – qui gère les tâches de routine – est toujours sa-

mulé quand les participants laissent leur esprit vagabonder. Plus étonnant : le réseau exécutif – qui aide à la résolution de problèmes plus complexes – s'active aussi fortement quand les sujets rêvassent. Autrement dit, tout en vagabondant, le cerveau réfléchirait davantage, ce qui permettrait au sujet de trouver des solutions à des questions complexes même s'il n'y pense pas à ce moment-là.

À l'instar de certaines phases du sommeil qui consolident des souvenirs ou aident à circonscrire un problème, laisser son esprit vagabonder serait utile. Un enfant ne rêve pas... il réfléchit. Laissons-le donc rêver. Cette activité au repos, qui réhabilitée en l'absence de leçons, des activités extrascolaires.

→ **Bénédicte Salthun-Lassalle**

K. Christoff et al., PNAS, en ligne, mai 2009

Biologie animale

Un dragon de Komodo... peu commode

Ce varan géant d'Indonésie ne tue pas grâce aux bactéries pathogènes coincées entre ses dents, mais plutôt grâce à un venin.

Biauwak rarak, c'est-à-dire crocodile terrestre, pour les habitants de Flores et de Rinca, en Indonésie, *biawak raksasa*, soit varan géant, pour d'autres... L'animal le plus connu sous le nom de dragon de Komodo (*Varanus komodoensis*), du nom de l'île où il vit. Le plus gros spécimen identifié mesurait 3,13 mètres de longueur pour 166 kilogrammes ! On connaît peu de choses sur sa stratégie de chasse. Ainsi, de nombreuses proies, après avoir été mordues, sont relâchées, mais succombent peu après. On imaginait que la mort de la victime résultait d'hémorragie, mais aussi d'infections mortelles, car les dents crénelées du reptile recueillent des morceaux de viande en décomposition où des bactéries pathogènes prolifèrent. Brian Fry, de l'Université de Bristol, et ses collègues ont découvert une autre explication : le dragon de Komodo injecte un venin.

À l'aide de différentes techniques d'imagerie, ainsi que de prélèvements sur un animal

malade, les biologistes ont mis en évidence des glandes à venin, dérivées des glandes salivaires, situées dans la mandibule. L'analyse du poison a révélé des substances proches de celles que l'on trouve dans le venin d'autres serpents et d'un lézard venimeux. Ces molécules dilatent les vaisseaux sanguins et accélèrent ainsi l'écoulement du sang, provoquant la mort de la proie. D'autres composés, anticoagulants, participent au phénomène.

En outre, des simulations numériques ont montré que la morsure du dragon de Komodo est notablement moins puissante que celle d'un crocodile de taille équivalente : la faiblesse de la morsure du lézard est compensée par le venin. Enfin, des comparaisons anatomiques du reptile avec un genre de varan éteint (*Varanus*) ont révélé que ces reptiles disparaissent en fait les plus gros animaux venimeux ayant jamais existé !

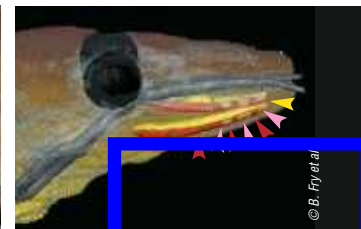
Doté de bactéries pathogènes dans la salive, le dragon de Komodo



est donc un chasseur redoutable. C'est aussi un prédateur qui ne gâche pas : là où les lions ne consomment que 25 pour cent de leurs proies, les varans n'en laissent que 12 pour cent, ingérant sabots, os, peau, intestins...

→ **Loïc Mangin**

B. Fry et al., PNAS, à paraître, 2009



L'imagerie RM d'une tête de dragon de Komodo révèle dans la mandibule les glandes à venin (ci-dessus, flèches rouges et roses), ainsi qu'une glande qui sécrète du mucus (ici en jaune). En contre, un dragon de Komodo se repaît d'un cervidé.

© B. Fry et al.

Biologie animale

Des fientes de manchots repérées par satellite

En 1991, le naturaliste britannique Bill Wilson parcourut 450 kilomètres à travers le polizzard antarctique pour trouver une colonie de manchots empereurs et en rapporter trois œufs. Aujourd'hui, pour ses successeurs, la tâche est plus aisée : ils repèrent par satellite les taches de guano des colonies.

Les manchots empereurs (*Aptenodytes forsteri*) se rassemblent pendant l'hiver en colonies de plusieurs centaines à quelques milliers d'individus pour se reproduire. Les biologistes qui les étudient ont découvert que les colonies laissent

des traces de guano sur la glace, entre 200 000 et 400 000 couples reproducteurs, en se fondant sur l'hypothèse qu'il existe 34 colonies. Mais ce chiffre, issu d'observations anciennes, n'a jamais été confirmé. Peter Fretwell et Phil Trathan, de la Mission *British Antarctic Survey*, ont voulu en avoir le cœur net : ils ont cherché à détecter les colonies de manchots sur les images satellitaires du programme LIMA (*Landsat Image Mapping of Antarctica*).

Les manchots sont indétectables sur la glace, mais ce n'est

que parce que les colonies laissent en passant jusqu'à huit mois sur la banquise. Celles que les chercheurs ont repérées en parcourant les images de 95 pour cent de la côte antarctique sont toutes sur la banquise, ce qui les distingue du guano des colonies de manchots Adélie, qui se trouvent sur des rochers. P. Fretwell et P. N. Trathan ont ainsi repéré 38 colonies de manchots empereurs, soit quatre de plus que ce qui était connu.

→ François Savatier

P. T. Fretwell et P. N. Trathan,



Image satellitaire de la baie de Halley en Antarctique. On y observe une tache de guano d'une colonie de manchots empereurs (flèche).

British Antarctic Survey

219 000 à 246 000 bébés naissent chaque année dans le monde par procréation médicalement assistée. En France, le chiffre était de 11 184 naissances en 2002.



Vue du centre de la Voie lactée prise par le télescope *Spitzer* en infrarouge. Dans le cartouche, une image d'une petite région de ce centre (le cercle blanc) prise par le satellite *Chandra* dans le domaine des rayons X.

D'où vient l'abondante émission de rayons X observée le long du plan de la Voie lactée ? De millions d'étoiles, pour la plupart des naines blanches ou des étoiles actives, affirme l'équipe de Vladimir Revniotsev, de l'Université technique de Munich, après analyse des données du satellite *Chandra*.

Cette émission X anormale s'étend sur deux degrés au-dessus du plan galactique et deux degrés au-dessous, et sur 40 degrés dans le plan. On l'interprétait

Astrophysique

L'émission X du centre galactique élucidée

comme la signature d'un rayonnement émis par du gaz chaud (environ 100 millions de degrés) qui se trouverait dans le plan galactique.

Mais un gaz aussi chaud aurait tendance à se disperser, et la Voie lactée n'est pas assez massive (sa gravitation n'est pas assez intense) pour le retenir. Et l'on ne connaît pas d'objets cosmiques capables de réalimenter ce gaz en permanence et de maintenir sa température.

Chandra a apporté des informations bien plus plausibles. Durant 22 jours, ce satellite sensible aux rayons X a observé la proximité du plan galactique, la région la plus intense, ainsi qu'une région de ce plan où l'absorption du rayonnement par le gaz et la

poussière est faible. *Chandra* a détecté 73 sources X dans une portion du ciel équivalente à environ trois pour cent de la pleine lune. Plus de 90 pour cent de l'émission X diffusée dans le plan galactique semble provenir de ces sources. La plupart seraient des naines blanches avalant la matière d'un astre compagnon, ou des étoiles à forte activité magnétique. On avait récemment observé que les distributions des émissions X et infrarouges étaient similaires, ce qui laissait penser que certaines étoiles sont aussi des sources X. Cette intuition est désormais confirmée et le mystère de l'émission X du centre de la Voie lactée levé.

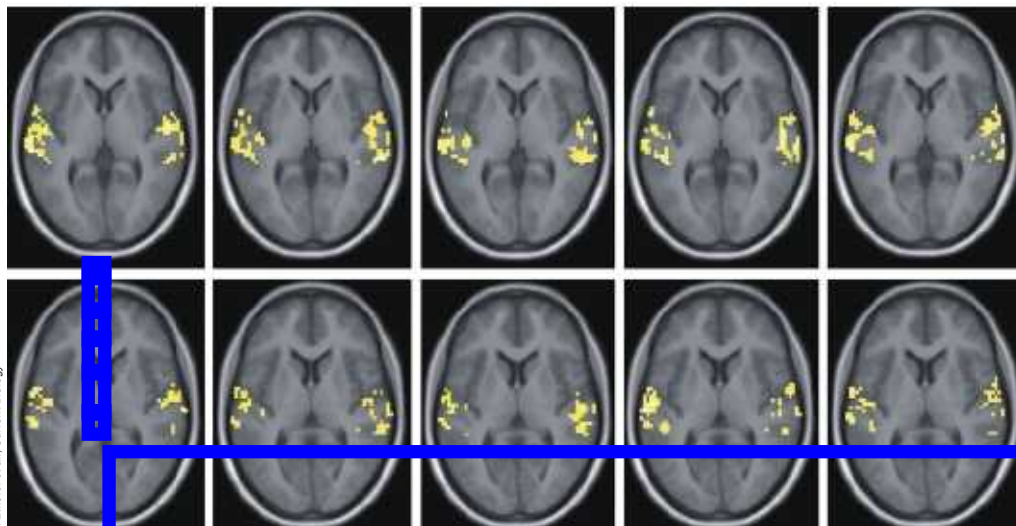
→ Stéphane Fau

M. Revniotsev et al., *Nature*, 2006, 441, 111-114, 2006

Neurobiologie

Le code cérébral des émotions vocales

Le cortex auditif du cerveau distingue les émotions véhiculées par la voix, avant que nous n'en prenions conscience.



T. Ethofer et al., Current Biology

Selon l'émotion étudiée (colère, tristesse, absence d'émotion, soulagement et joie, le gémissement), l'activation du cortex auditif antérieur (figure) – l'activité de 400 zones actives enregistrée en IRM fonctionnelle dans deux plans du cerveau (en haut et en bas).

Par quel mécanisme percevons-nous instantanément les intonations et les émotions véhiculées par la voix de nos interlocuteurs ? L'équipe de Patrik Vuilleumier, du Centre de neurosciences de l'Université de Genève, montre que le cortex auditif est capable de distinguer les émotions véhiculées par la parole.

Les chercheurs ont fait entendre à 22 sujets une phrase dénuée de sens – *Ne kalibam sout molem* – et prononcée par des acteurs de façon à la charger de cinq types d'émotions : colère, tristesse, soulagement, joie et neutralité (absence d'émotion). Simultanément, l'activité cérébrale des sujets était suivie par IRM fonctionnelle. Sur les images du cerveau ainsi obtenues, chaque catégorie d'intonation était associée à un ensemble de points d'activation (ou voxels) répartis sur l'ensemble des aires sensibles à la parole. Pour faire

apparaître d'éventuelles différences, l'activité du cortex auditif selon les types d'émotion entendus a été analysée mathématiquement à l'aide d'une analyse multivariée – où sont traitées de nombreuses variables numériques, ici la position des voxels – a été appliquée aux données enregistrées.

Les résultats montrent que le cortex encode les différentes émotions, autrement dit que chacune d'elles est associée à une distribution spécifique des zones activées dans le cortex auditif. Ces signatures cérébrales se ressemblent davantage lorsque les émotions sont de même intensité (par exemple colère, joie, soulagement), quel que soit le caractère positif ou négatif de leur connotation psychologique.

Comment le cerveau procède-t-il ? Probablement en analysant les paramètres physiques de la voix, variables en fonction de la prosodie (rythme, intensité et mélodie) :

la fréquence fondamentale et le timbre (sa composition en harmoniques multiples de la fréquence fondamentale). Selon leurs valeurs, ces paramètres activent des neurones différents.

C'est la première fois que l'on établit que le cortex auditif distingue les émotions, et qu'il est possible de mesurer ces différences par le biais de l'activité cérébrale.

Certaines personnes atteintes de maladies mentales, telles que la schizophrénie et les troubles bipolaires, ont des difficultés à ressentir certaines émotions. Il sera donc intéressant d'étudier si ce déficit trouve ses racines dans le cortex auditif ou plus en aval dans le traitement des informations, notamment dans les régions frontales, au moment de l'interprétation consciente de ces signaux.

→ Jean-Jacques Perrier

T. Ethofer et al., Current Biology, en ligne, 11 mai 2009

Environnement

PREMIÈRE ASTRONOMÉTRIQUE

L'astrométrie vient de faire ses preuves pour détecter des exoplanètes. La méthode consiste à mesurer les infimes oscillations d'une étoile dues à l'influence d'une planète. Elle favorise la détection de planètes massives et distantes de leur étoile, ou « Jupiters froids ». À la NASA, des astronomes viennent ainsi de découvrir, pour la première fois de cette façon, une planète six fois plus massive que Jupiter autour d'une étoile naine rouge, soit semblable à celle de notre système

THÉRAPIE GÉNÉRIQUE

L'anémie de Fanconi est une maladie génétique de la production des cellules sanguines. Par thérapie génique, des chercheurs ont corrigé *in vitro* l'anomalie des cellules de la peau prélevées chez les malades. De là, ils ont produit des cellules souches pluripotentes et induites, qu'ils ont fait se différencier en « progéniteurs » capables de donner des cellules sanguines. Ce résultat confirme le potentiel de l'alliance entre thérapie génique et cellules souches, toutes deux plus sûres.

LA PEAU : JARDIN OU DÉSERT ?

Une analyse de 20 zones de la peau de dix volontaires a révélé que plus de 1 000 espèces de bactéries réparties en 19 groupes colonisent notre épiderme et notre derme de façon naturelle. La peau recèle plusieurs « niches écologiques » semblables d'un individu à l'autre, mais dont la composition varie. La région la plus peuplée est l'avant-bras, avec 44 espèces. Une connaissance utile pour mieux comprendre l'acquisition de dermatoses et de micro-organismes résistant aux antibiotiques.

En bref

MEILLEURS À PLUSIEURS

Le pluriel ne vaut rien à l'homme, chantait B. Assens. Pour un oiseau, en revanche, résoudre un problème est plus simple à plusieurs, affirme une étude de deux chercheurs hongrois. Un groupe de six moineaux domestiques réussit 11 fois plus vite qu'un binôme à enlever des couvercles transparents bloquant l'accès aux graines d'une mangeoire. L'analyse montre que les expériences et les compétences individuelles des moineaux se complètent et multiplient les chances de succès.

POTERIE DE 18 000 ANS

La production de poteries a commencé très tôt en Asie. La physicienne Elisabetta Boaretto, de l'Institut Weizmann, et l'archéologue Xiaohong Wu, de l'Université de Pékin, viennent de prouver qu'une couche sédimentaire contenant des récipients en terre cuite de la grotte de Yuchanyan, en Chine, date de 18 000 ans, soit juste après le maximum glaciaire ! En Europe, la production de pots en terre cuite ne s'est développée que bien plus tard, après celle du Proche-Orient, laquelle a débuté il y a 10 000 ans environ.



NASA/Dana Berry

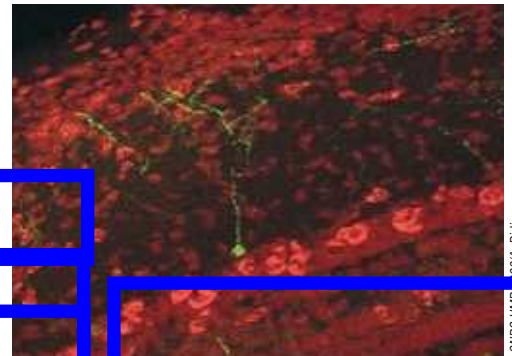
Vue d'artiste d'un pulsar en train d'accréter la matière de son étoile compagne. Cette accrétion augmenterait la fréquence de rotation du pulsar en transformant celui-ci en pulsar milliseconde.

Neurobiologie

La fougueuse jeunesse des neurones

Les nouveaux neurones (en vert)

dans le bulbe olfactif sont repérés grâce à une protéine fluorescente, la GFP.



2004, Didier CNRS UMR

Jusqu'à dans les années 1990, on pensait que, chez les adultes, aucun neurone n'était fabriqué. Ce dogme est tombé avec la découverte d'une neurogenèse (une production de nouveaux neurones) dans quelques régions du cerveau adulte. De lors, on imagina greffer des neurones (d'origine embryonnaire) chez des individus atteints de maladies neurodégénératives, mais les succès n'ont pas été au rendez-vous. Pierre-Marie Lledo, de l'Institut Pasteur et du CNRS (URA 2182), et ses collègues viennent d'apporter une nouvelle preuve : les jeunes neurones sont hyperactifs. En revanche, cette hyperactivité ne se prolonge pas, et ils perdent rapidement cette propriété.

Les neurobiologistes ont étudié des jeunes neurones nouvellement formés dans le bulbe olfactif de souris adultes et se sont intéressés à la plasticité de certaines de leurs synapses. Ils ont mis en évidence un phénomène de « pruning » (élagage) des synapses.

« On a vu que les synapses sont activées et « renforcées ». En d'autres termes, les jeunes neurones sont hyperactifs, sans doute sous l'effet de stimulations olfactives, et ce pendant 12 semaines, avant de retrouver une activité plus faible, semblable à celle des neurones matures. En fin de compte, la moitié de la population de nouveaux neurones – vraisemblablement les plus actifs – s'installe dans les circuits neuronaux préexistants du bulbe olfactif. L'élimination des autres favorise un renouvellement constant des neurones.

Cette sélection a-t-elle aussi lieu dans d'autres régions du cerveau ? On comprendrait alors mieux pourquoi les personnes atteintes de la maladie de Parkinson ont des déficits moteurs normaux après une greffe de neurones d'origine embryonnaire, mais qui restent actives que peu de temps.

→ L. M.

L. M. et al., *Journal of Neuroscience*, en ligne, 9 mai 2009

Astrophysique

Pulsars : le chaînon manquant révélé

En astronomie, les échelles de temps sont si longues qu'on ne voit pas les étoiles évoluer. Des objets qui se ressemblent sont-ils des objets distincts ou des objets du même type à des stades d'évolution différents ?

Cette question vient d'être résolue pour des étoiles nommées pulsars millisecondes. Victoria Kaspi, de l'Université McGill à Montréal et ses collègues ont montré que ce sont des pulsars classiques « recyclés ».

Les pulsars sont des étoiles à neutrons, hyperdenses, qui tournent sur elles-mêmes en émettant un faisceau d'ondes radio qui balaye périodiquement l'espace. Ces « phares du cos-

mos » ont en général quelques tours par seconde. Mais certains, dits millisecondes, tournent sur eux-mêmes plusieurs centaines de fois par seconde. Quelle est leur origine ?

On les soupçonne depuis longtemps d'être des pulsars classiques recyclés dans des systèmes binaires : l'accrétion de matière issue d'une étoile compagne augmentait la vitesse de rotation du pulsar. Cependant, si l'accrétion autour d'étoiles à neutrons a été observée, aucune émission radio n'était alors décelable. Est-ce pour une raison technique ou réapparaît-elle qu'ensuite ?

C'est ce qui semble s'être produit pour le pulsar J1023. Lors

d'observations réalisées avec le radiotélescope de Green Bank, l'équipe de V. Kaspi a repéré un pulsar qui tourne 592 fois par seconde sur lui-même.

Cet objet avait déjà été observé en 1999 ; c'était alors un pulsar classique dans un système binaire. En 2000, il avait brusquement évolué : on avait détecté un disque d'accrétion et la pulsation radio s'était tue. Selon les dernières observations, l'étoile à neutrons est aujourd'hui redevenue un pulsar milliseconde.

Le mystère de la filiation des pulsars millisecondes semble enfin résolu.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

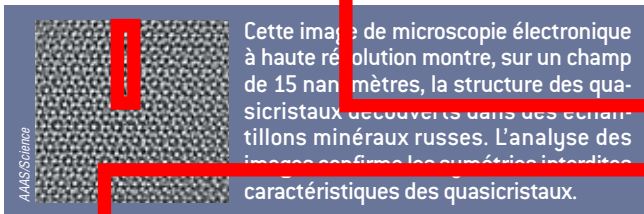
A. M. Archibald, *Planète Science Express*, 21 mai 2009

Minéralogie

Un quasicristal naturel

Paul Steinhardt, de l'Université de Princeton, et trois collègues ont mis en évidence des quasicristaux dans des échantillons de minéraux provenant des montagnes de Koryak, en Russie. Découvert il y a 25 ans, les quasicristaux sont des matériaux dont la structure atomique est presque périodique, et respecte des symétries (telle la symétrie pentagonale, symétrie de rotation de $360/5 = 72$ degrés par rapport à un axe) qui seraient impossibles dans un vrai cristal, matériau strictement périodique. Jusqu'ici, tous les exemples de quasicristaux ont été synthétisés en laboratoire, dans des conditions bien contrôlées. Les quasicristaux trouvés par l'équipe de P. Steinhardt sont des grains de taille micrométrique d'un alliage d'aluminium, de cuivre et de fer. Leur structure cristalline ne comporte six axes de symétrie pentagonale. Comment la nature a-t-elle formé de tels matériaux ? La question reste ouverte. Quel qu'il en soit, il semble qu'il faudra étendre la définition des minéraux.

→ M. M.

L. Bindl et al., *Science*, vol. 324, pp. 1306-1309, 2009

Cette image de microscopie électronique à haute résolution montre, sur un champ de 15 nanomètres, la structure des quasicristaux découverts dans des échantillons minéraux russes. L'analyse de ces images confirme les symétries interdites caractéristiques des quasicristaux.

Biologie animale

Fourmis : digestion partagée

Le partage des tâches est une caractéristique des insectes sociaux que sont les fourmis ou les abeilles. La nutrition ne fait pas exception, et Audrey Dussutour, du Centre de recherche sur la cognition animale (CICAP), Université Paul Sabatier, et Stephen Simpson, de l'Université de Sydney, ont montré que les fourrageurs – les fourmis ouvrières qui rapportent la nourriture au nid – sont informés des besoins nutritionnels des larves et adaptent leur récolte.

Les biologistes ont mis à disposition de colonies de fourmis *Rhytidoponera* ayant ou non des larves – de la nourriture riche en sucre ou bien riche en protéines. Quand il y a des larves dans la colonie, les ouvrières rapportent surtout de la nourriture riche en protéines, lesquelles permettent aux larves de se développer. En revanche, quand il n'y a pas de larves, les fourmis préfèrent la nourriture riche en sucre.

En outre, les biologistes ont montré que les fourmis rapportent toujours la même quantité de sucre : s'il y a trop de protéines, elles extraient le sucre et le digèrent, régurgitant les protéines à l'extérieur du nid. Or les fourmis nourries avec trop de protéines meurent beaucoup plus que les autres, car les protéines sont toxiques, pour des raisons inconnues. En fait, ces fourmis meurent parce qu'elles ne peuvent pas assimiler les protéines. Ces résultats indiquent que les fourmis se partagent les tâches jusqu'à la nourriture : certaines font la récolte, les autres digèrent le sucre, les autres les protéines.

→ B. S.-L.

A. Dussutour et S. Simpson, *Current Biology*, vol. 19, pp. 740-744, 2009

Géophysique

Un manteau à une couche

Le manteau terrestre serait composé d'une couche unique, mais non homogène.

Le manteau terrestre comporte-t-il deux couches ou une seule ? Deux géochimistes des États-Unis ont récemment proposé un modèle en faveur d'un manteau à couche unique, mais qui serait hétérogène.

Leur point de départ est une observation géochimique : la composition des basaltes des îles océaniques, telles Hawaii et la Réunion, et celle des dorsales océaniques diffèrent. Les basaltes des îles océaniques semblent résulter d'une remontée de matière profonde, d'un « point chaud » qui devrait être localisé dans le manteau profond, tandis que les seconds auraient une origine plus superficielle. Pour aboutir à cette conclusion, les géochimistes ont étudié les rapports de deux isotopes de l'hélium : l'hélium 3, un isotope « primordial » incorporé au manteau profond lors de la formation de la Terre, et l'hélium 4, issu de la décomposition radioactive d'éléments du manteau supérieur (uranium et thorium). Le rapport isotopique est inférieur pour les basaltes de point chaud. Cette observation semblait conforter l'hypothèse d'un manteau supérieur et d'un manteau inférieur séparés par une zone de transition située entre 410 et 660 kilomètres de profondeur.

Toutefois, selon la théorie de la tectonique des plaques, le manteau est parcouru de courants de convection. Or la convection se produisant dans l'ensemble du man-

teau, elle devrait mélanger les différents isotopes de l'hélium et tous les basaltes devraient avoir la même composition. De surcroît, lorsque deux plaques entrent en collision, l'une plonge sous l'autre et pénètre dans le manteau supérieur. Or certaines plaques plongeantes semblent s'enfoncer bien au-delà de la zone de transition. Voilà qui plaide pour un manteau à couche unique.

Afin de réconcilier les différentes données, les deux géochimistes proposent un nouveau modèle : les plaques plongeantes seraient pauvres en hélium, car ce gaz serait libéré en surface par dégazage. De ce fait, le contenu en hélium du manteau profond aurait diminué au cours du temps, ce qui aurait entraîné la même génération de manteau par convection (une partie de hélium 3 serait restée « piégée » en profondeur).

François Albarède, de l'École normale supérieure de Lyon avait proposé un scénario voisin en 2008 : selon lui, le manteau serait bien constitué d'une seule couche hétérogène. D'une part, le manteau profond serait riche en gaz primordial tel l'hélium 3 ; d'autre part, la zone de transition entre la couche supérieure et la couche inférieure serait moins étanche qu'on ne le croyait, en particulier sous le Pacifique et l'Atlantique.

→ J.-J.-P.

H. M. Gorn et S. Mukhopadhyay, *Nature*, vol. 460, pp. 650-653, 2009

Une fontaine de lave à Hawaii

J.D. Goggin

Archéologie

Falaise, premier château normand en pierre ?

À 30 kilomètres au Sud de Caen se trouvent Falaise et son château ducal, que plus de 40 000 visiteurs viennent découvrir chaque année. L'existence d'une partie des remparts et certains des archéologues de la Direction régionale des affaires culturelles (DRAC) à prouver que la première fortification du château remonte à la fin du I^{er} siècle.

L'indice clef de cette ancienneté est l'appareillage en *opus piscatum* (arête de poisson) de certaines parties du rempart, c'est-à-dire à base de pierres inclinées à 45 degrés, en changeant de sens à chaque strate successive. Découverts à la base du rempart, donc dans la toute première enceinte, de minuscules charbons de bois ont pu être datés au carbone 14 entre 960 et 1020. Or, à cette époque, les guerriers dressaient presque toujours des donjons de bois au sommet d'une motte ou de tout promontoire naturel, l'entouraient d'une palissade de bois et ménageaient éventuellement une basse-cour ceinte d'une autre palissade pour permettre aux roturiers qu'ils protégeaient de s'y réfugier. Dominant l'agglomération qui s'est peu à peu constituée à ses pieds, le château de Falaise présente exactement cette structure, sauf qu'il fut très tôt érigé en pierre. Pour le médiéviste Pierre Bouet, de l'Université de Caen, cette constatation illustre de façon spectaculaire la présence de populations sédentaires à Falaise, et plus de 500 fortifications normandes contemporaines du premier château de Falaise, à peine cinq sont bâties en pierre, en chaux et en sable.

→ F. S.



Vue des remparts Est et des pierres en *opus piscatum* [flèche].

Ville de Falaise

Médecine

Infertilité féminine : deux molécules identifiées

Un à dix pour cent des couples connaissent des difficultés pour concevoir un enfant, et dans deux tiers des cas, l'infertilité est féminine. Dans trois cas sur quatre, il s'agit d'un syndrome des ovaires polykystiques, une pathologie ayant plusieurs causes possibles, mais qui aboutit en général à une absence d'ovulation. Hong-Yu Fan et ses collègues, de l'École de médecine Baylor à Houston (Texas, États-Unis), ont identifié deux enzymes nécessaires à l'ovulation et aux mécanismes qui en découlent.

Pour qu'il y ait fécondation, un spermatozoïde doit rencontrer un ovule. À chaque cycle menstruel, dans l'ovaire, un follicule (un agrégat de cellules contenant un ovocyte) se développe et grossit; quand il est mature, l'ovocyte est libéré dans la trompe qui conduit à l'utérus, cet ovocyte est prêt à être fécondé par un spermatozoïde.

Deux hormones libérées par une glande du cerveau, l'hypophyse, permettent au follicule de se développer: la folliculostimuline participe à la maturation du follicule, et la lutéinostimuline provoque la rupture du follicule et la libération de l'ovocyte. Si la maturation du follicule est arrêtée, l'ovulation n'a pas lieu.

H.-Y. Fan et ses collègues se sont intéressés au follicule lui-

même et aux cellules qui entourent l'ovocyte. Au moment de l'ovulation, les cellules folliculaires se transforment et produisent des hormones indispensables à l'implantation de l'embryon et à la poursuite de la grossesse quand il y a fécondation. Différents facteurs de croissance et la lutéinostimuline qui permet la rupture du follicule – activent une voie de signalisation cellulaire, dite des *mitogen-activated protein kinases* (pour *mitogen-activated protein kinases*): il s'agit des enzymes MAPK3 ou ERK1 (pour *extracellular signal-regulated kinase*) et MAPK1 ou ERK2, dont on vient de découvrir le rôle essentiel dans l'ovulation.

Comment les biologistes l'ont-ils montré? Ils ont créé des souris où ERK1 et ERK2 sont inactivées uniquement dans les cellules entourant l'ovocyte. Ces souris sont stériles et présentent plusieurs anomalies des ovaires: la maturation des ovocytes est stoppée et l'ovulation n'a pas lieu. Ainsi, l'absence des protéines ERK, *in vivo*, empêche la lutéinostimuline d'activer les gènes contrôlant l'ovulation. L'identification de ce mécanisme cellulaire devrait permettre de mieux comprendre les causes des pathologies touchant l'ovaire.

→ B. S.-L.

H.-Y. Fan et al., *Science*, vol. 324, pp. 938-941, 2009

DERNIÈRE minute ...

NANODIAMANTS FLUORESCENTS

Les molécules fluorescentes permettent notamment de suivre des molécules biologiques et leurs interactions. Mais elles ont souvent une courte durée de vie en raison de leur réactivité chimique. Or des physiciens français et allemands ont pu fabriquer en grande quantité des nanodiamants fluorescents stables. Ils ont rendu fluorescents des microdiamants indus-

triels par irradiation électronique à haute énergie et ultracourte, puis ont réduit la taille des microdiamants pour en faire des nanoparticules, sans altérer leurs propriétés.

NANODIAMANTS FLUORESCENTS

Bombarder au laser ultrabref un métal noir augmente l'émission lumineuse quand ce métal est incandescent. C. Guo et ses collègues, de

l'Université de Rochester, l'ont constaté en irradiant avec un faisceau femtoseconde le filament d'un tungstène d'une lampe à incandescence. À la surface du métal, le faisceau produit des nanostructures dont l'effet est d'amplifier l'émission lumineuse, elles peuvent aussi être exploitées pour modifier la couleur de la lumière. Une ampoule de 60 watts ainsi traitée éclaire autant qu'une ampoule de 100 watts.

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ TOUCHER POUR APPRENDRE

Il y a une semaine, l'équipe d'Édouard Gentaz, à Grenoble, montrait que les enfants reconnaissent et mémorisent mieux des formes géométriques s'ils les apprennent en les voyant et en les touchant (voir *Apprendre en touchant*, *Pour la Science*, septembre 2008, p. 14). Aujourd'hui, elle obtient des résultats semblables avec des adultes (*PloS One*, mars 2009), montrant que le toucher facilite l'apprentissage de la lecture – d'une langue étrangère par exemple. Les chercheurs ont demandé à une trentaine d'adultes francophones d'apprendre 15 stimulus visuels inconnus, inspirés de lettres japonaises, et les 15 sons correspondants. Certains travaillent uniquement en voyant les « pseudolettres », les autres utilisent le toucher et la vision. Les participants apprennent bien ces stimulus quelle que soit la méthode. Puis les chercheurs ont mesuré les performances de chaque adulte lors de deux tests mesurant leurs capacités à apprendre des associations entre stimulus visuels et auditifs : les partici-

pants ayant appris les stimulus de façon multisensorielle reconnaissent mieux le son correspondant à un stimulus visuel, et inversement. Le toucher permet de mieux connecter la vision et l'audition.

→ DES JEUNES SUPERNOVAE

Les supernovae de type Ia sont des explosions de naines blanches, elles-mêmes étant des étoiles de type solaire en fin de vie. Elles exploseraient quand elles absorbent trop de matière d'une étoile compagne. Comprendre les mécanismes de ces explosions est essentiel aux astronomes, car la luminosité intrinsèque des supernovae est constante, de sorte que ces objets célestes servent d'indicateurs pour estimer des distances entre galaxies (voir *Supernovae : des explosions énigmatiques*, *Pour la Science*, octobre 2005).

Aujourd'hui, avec un nouveau modèle, des astronomes chinois confirment l'origine des supernovae de type Ia et le fait que la moi-

tié d'entre elles explosent moins de 100 millions d'années après la période de formation des étoiles majeures de leur galaxie (*Royal Astronomical Society*, avril 2009). Ils montrent que les supernovae « jeunes » correspondent à des naines blanches attirant du matériel d'une étoile compagne à bélium, émettant dans le bleu, et que c'est seulement dans ce cas que l'explosion a lieu moins de 100 millions d'années après la période de formation des étoiles.

→ LA MORTELLE BACTÉRIE !

Tout le monde sait que la cellule de vie est enfermée dans son ADN, que celle-ci soit une composante d'un organisme ou qu'elle soit seule, comme une bactérie. Quand l'ADN est lésé, il faut qu'il soit vite réparé pour que la cellule survive ou ne devienne pas « tumorale » ; pour ce faire, un système de réparation dit SOS, présent dans toutes les cellules, permet à l'ADN de rester fonctionnel (voir *SOS génome : réparation et évolution*, *Pour la Science*, mars 2000). Une bactérie, *Deinococcus radiodurans*, est experte en réparation, car elle survit aux rayonnements ionisants, à une désydratation extrême, aux produits toxiques et à d'autres agents endommageant l'ADN. Quand elle est exposée à des doses de rayonnements 1 000 fois supérieures au seuil mortel pour l'homme, son ADN se dégrade en centaines de fragments puis « ressuscite ». Comment fait-elle ? Des chercheurs français ont montré que cette réparation de l'ADN implique quatre enzymes présentes non seulement chez cette bactérie, mais aussi dans toutes les cellules (*Cell*, mars 2009). L'inactivation de chacune de ces enzymes suffit pour que la bactérie ne résiste plus à des rayonnements énergétiques. Deux enzymes déclenchent la synthèse d'ADN, deux autres réparent et répliquent les fragments d'ADN endommagés ; puis les chromosomes se reforment. *Deinococcus radiodurans* utilise donc les mêmes enzymes que n'importe quelle cellule, de façon plus efficace et plus précise... Mais on en ignore encore.

→ **Bénédict Salthun-Lassalle**

→ DES ESPÈCES MARINES MENACÉES ?

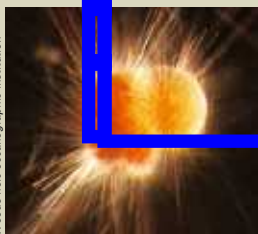
De nombreuses espèces marines – le corail, des algues, des foraminifères, des coccolithophores, des ptéropodes (de petits escargots), etc. – sont des organismes calcaires dotés d'un squelette de calcite et d'aragonite. Or une partie du dioxyde de carbone libéré dans l'atmosphère – par la combustion des énergies fossiles – se dissout dans les océans où il augmente l'acidité de l'eau et diminue la disponibilité en ions carbonates nécessaires à la synthèse de ces squelettes calcaires (voir *L'acidification des océans : l'écosystème menacé*, *Pour la Science*, mai 2006). Plusieurs études ont montré que ce phénomène diminue la calcification des espèces marines. Des biologistes australiens ont comparé le poids des coquilles de foraminifères piégées dans des sédiments datant d'il y a 10 000 ans à celui de coquilles récupérées dans une couche récente de sédiments (*Nature Geoscience*, mars 2009). Ce dernier est 30 à 35 pour cent inférieur, et cette diminution de la calcification dépend bien des concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone. En outre, une autre équipe, américaine, a montré que les particules en suspension dans l'air (le cuivre, l'azote, le fer, le phosphore) favorisent la

croissance du phytoplancton ou, à l'inverse, le détruisent ; tout dépend de l'espèce et de l'aérosol considérés (*PNAS*, mars 2009). Par exemple, les particules de cuivre sont toxiques pour la cyanobactérie *Synechococcus*, mais inoffensives pour *Prochlorococcus*. L'influence de l'atmosphère sur l'écosystème marin reste à explorer.

Les foraminifères (ci-contre) et les coccolithophores (en haut) ont un squelette calcaire.



Steve Gschmeissner, Photo researches, Inc.



Woods Hole Oceanographic Institution

POINT DE VUE

Pour une égyptologie égyptienne

L'égyptologie égyptienne devient le fer de lance de l'égyptologie mondiale. Les égyptologues de France doivent accompagner le mouvement.

Guillemette ANDREU-LANOË

Grèce et Romains, parmi d'autres, ont puisé aux sources de la culture égyptienne antique ; aujourd'hui, les Arabes puisent à celles de la culture égyptienne moderne. La vitalité de l'Égypte ne se dément pas, et se traduit par le développement du pays, notamment de sa science. C'est pourquoi, l'archéologie en Égypte ayant évolué au cours de la décennie passée, l'égyptologie française doit faire de même : ce qui importe désormais, c'est d'accompagner les Égyptiens dans la mise en valeur de leur patrimoine archéologique, l'un des plus riches et des plus précieux de l'humanité.

En 50 ans, l'Égypte est passée de moins de 30 millions d'habitants à plus de 70. Le pays diversifie son économie autrefois essentiellement agraire. Il a découvert son potentiel touristique, et les vestiges pharaoniques y jouent un grand rôle. Alors que la culture arabe traditionnelle avait détourné les Égyptiens de leur passé préislamique, la situation a évolué. Aujourd'hui, en Égypte, des groupes d'élèves visitent les sites archéologiques, et les explications qu'ils reçoivent sont de qualité, car le pays s'est doté d'égyptologues compétents, ayant une solide formation. Dans le même temps, l'État égyptien crée les infrastructures dont a besoin sa population. Dans toutes les grandes villes qui sont aussi des cités antiques – Héliopolis, Alexandrie, Le Caire, Louxor, Assiout, Minia, Assouan, etc. – des travaux publics ou privés sont en cours. Ils visent de nombreux sites d'un grand intérêt scien-

tifique même s'ils ne sont pas tous spectaculaires. Une autoroute à quatre voies longe aujourd'hui le temple de Karnak, et sa présence a détruit des paysages millénaires. Mais en développement, l'Égypte ne s'est pas encore dotée de lois de protection de son patrimoine archéologique, de sorte que, Alexandrie exceptée, l'archéologie préventive y est peu pratiquée.

Pour autant, les Égyptiens cherchent plus aujourd'hui à valoriser le patrimoine déjà découvert qu'à accumuler sans fin de nouveaux vestiges. Il y aurait déjà en Égypte plus de 100 000 momies sur étagères, mal entretenues, peu étudiées, en particulier sur le plan anthropologique, alors qu'elles représentent un incomparable échantillon de population antique, les papyrus et inscriptions

ment sa permission, afin de faciliter le plus possible le sauvetage de données en perdition. Les zones géographiques prioritaires sont le Nord du Sinaï et le delta du Nil, où de nombreux sites fragiles en milieu alluvionnaire méritent d'être étudiés.

Face à cette évolution, comment doit réagir l'égyptologie française ? Tout d'abord, le sauvetage des sites et vestiges menacés doit faire partie des objectifs scientifiques. Les égyptologues britanniques et américains ont déjà bien avancé dans cette direction, puisqu'ils mènent de nombreux chantiers sur des sites prestigieux, où ils recueillent un nombre d'informations essentielles même si elles ne concernent pas l'élite pharaonique. Ensuite, l'égyptologie française doit organiser son travail afin de faci-

ENTASSER ENCORE DES VESTIGES ?

Il y aurait déjà plus de 100 000 momies sur étagères, mal entretenues, peu étudiées...

déjà accumulées représentent sans doute plus d'un siècle de travail pour l'ensemble des savants du monde capables de les étudier. Dès lors, pourquoi continuer à entasser des momies, du matériel funéraire d'élite et du mobilier tiré de sites déjà connus ?

Aujourd'hui, le Conseil suprême des antiquités égyptiennes dirigé par Zahi Hawass n'accorde qu'au compte-gouttes les permis de fouilles dans les sites prestigieux : une équipe qui veut ouvrir un chantier doit pouvoir invoquer un enjeu scientifique majeur. En revanche, partout où les vestiges sont en danger, le même Conseil accorde aisé-

ment la valorisation de leur patrimoine par les Égyptiens. Ainsi, notre équipe du CEA a pu mener des fouilles sur le site de Saqqara depuis des décennies, et il est temps qu'elle complète sa connaissance approfondie qu'elle a de ce lieu et qu'elle la transmette notamment en finalisant l'élaboration d'un plan topographique accompagné d'une lecture stratigraphique précise. Nous sommes aussi prêts à aménager ce site majeur afin de rendre sa visite possible.

Si elle veut augmenter à terme son efficacité, l'égyptologie mondiale doit se doter d'un solide fer de lance scientifique égyptien. La patrie de Champollion peut y contribuer puisque plus de 100 chercheurs français travaillent à restituer le passé égyptien. Il serait donc logique que des bourses doctorales facilitent une certaine passation du savoir scientifique vers la jeunesse gène-

ration égyptienne, malheureusement de moins en moins francophone. Cette transmission peut aussi se faire en allant enseigner en Égypte. La France, et notamment le musée du Louvre, est par ailleurs à la pointe des techniques de conservation et de restauration. Puisque l'évolution de l'archéologie égyptienne nous renvoie vers nos collections, qu'elle nous pousse à valoriser en les replaçant mieux dans leur contexte, nous pourrions faire bénéficier nos amis égyptiens de l'expérience française en ce domaine. Nous pourrions aussi leur faire partager notre savoir-faire en matière de protection et de valorisation des monuments historiques. Dans cette optique, Christophe Thiers, le nouveau codirecteur français du Centre franco-égyptien d'étude

des temples de Karnak vient de signer avec son collègue Mansour Boraïk, codirecteur égyptien du même centre, un accord concernant la formation d'inspecteurs du Conseil suprême des antiquités d'Égypte et de jeunes universitaires égyptiens. Les thèmes abordés dans ce chantier-école dérivent de l'étude scientifique des temples de Karnak menés lors des fouilles et autres chantiers conduits par le centre franco-égyptien.

Pourvu qu'elle soit quelque peu rationalisée, la coopération archéologique franco-égyptienne est prometteuse. On observe déjà que les archéologues de l'Institut national d'archéologie préventive (INRAP) sont de plus en plus souvent sollicités par les Égyptiens. Rien d'étonnant à cela : leur savoir-faire dans l'enregistrement efficace et rapide de

données archéologiques est l'un des plus grands du monde. En France, les « inrapiens » ont su démontrer que le sauvetage financé par l'aménageur est loin d'être la huitième plaie... l'Égypte. Pourquoi ne pas imaginer des missions composées d'égyptologues égyptiens et français et d'archéologues de l'INRAP qui aient par les basses et les hautes terres égyptiennes inoculer le virus vertueux de l'archéologie préventive ? Plutôt que de nouvelles momies, c'est avant tout de cela qu'il faut avoir besoin l'archéologie égyptienne...

Guillaume André, *Laocécange*,
le Département des antiquités égyptiennes
du Musée du Louvre.

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

ÉCONOMIE

Le patron est-il dépassé ?

Le bilan d'une entreprise publique n'est pas uniquement financier, et l'intérêt général est mieux représenté par un mode de gestion collectif que par un chef ou un patron.

Ivar EKELAND

Chaque époque a ses mots-clés, la nôtre comme les autres, et le mot de « patron » est certainement l'un de ceux qui la caractérisent. Quand j'étais plus jeune, je ne le trouvais guère que dans les romans de Simenon, mais aujourd'hui je ne peux plus écouter la radio, regarder la télévision ou lire le journal sans qu'on m'explique que les universités, les hôpitaux et même l'État ont besoin d'un patron, tout comme les entreprises, et que s'ils n'en ont pas, il est urgent de les réformer pour qu'ils en aient un.

Il y a 60 ans, on aurait parlé de « chef », et ce mot marquait l'entre-deux guerres tout comme le mot de « patron » marque notre société. Le but recherché est le même, empêcher les gens de penser par eux-



mêmes et les inciter à s'en remettre à un homme providentiel, mais la couverture idéologique est différente : alors que la notion de « chef » s'appuie sur des pré-supposés politiques, celle de « patron » repose sur de fausses évidences économiques. Voyons cela.

L'image que véhicule le mot « patron » est celle d'un homme qui possède son entreprise et qui la gère lui-même. Les intérêts du gestionnaire sont alors parfaitement alignés avec ceux du propriétaire, puisqu'il s'agit d'une seule et même personne. En revanche, ils ne sont alignés ni avec ceux des salariés, ni même avec ceux du public : le gestionnaire n'a pas de raison de prendre en compte l'impact, positif ou négatif, de son entreprise sur l'environnement.

Ainsi, même dans ce cas, le plus simple possible, le patron n'apporte pas nécessairement les bonnes réponses, et l'État peut être conduit à intervenir dans l'intérêt général. Si maintenant on passe au cas le plus répandu, celui où l'entreprise appartient à une société, la figure du « patron » apparaît encore plus problématique, car ses intérêts ne sont plus alignés sur ceux des propriétaires. On peut penser, au contraire, que des patrons incontestés, comme Messier ou Bouyon, ont pris davantage de risques que les actionnaires n'auraient souhaité.

notamment parce que le système de rémunération par stock-options les exposait aux gains et non aux pertes.

Les entreprises privées, de l'épicerie du coin à la Société Générale, ont un seul objectif : faire du profit, et le plus grand possible. C'est le fameux *bottom line* des Américains, la dernière ligne du bilan. Les entreprises publiques, en revanche, ont une multiplicité d'objectifs. Une université doit assurer la formation initiale, la formation

continue et la recherche. Par rapport à une entreprise privée, la difficulté est triple : ces objectifs sont incompatibles (comme on a des ressources humaines limitées, si on les affecte toutes à l'enseignement, il n'en restera pas pour la recherche), ils ne sont pas mesurables immédiatement (pour juger de la qualité d'une formation, il faut attendre quelques années, pour voir comment les diplômés se sont placés), et le bénéfice que la société en tire est systématiquement sous-évalué (comment chiffrer le fait que tous les citoyens sachent lire et écrire ?).

De même, un hôpital doit dispenser des soins, former des soignants, et faire de la recherche. Cette activité multiple ne peut pas, et même ne doit pas, se résumer à un bilan financier. Si le seul but est de faire des économies, il suffit de fermer les services de réanimation et de ne plus soigner les maladies chroniques. D'un point de vue économique,

le seul bilan qui vaille est le bilan social, c'est-à-dire la somme des utilités que les citoyens retirent de l'activité de l'hôpital, et qui doit

tenir compte tant de l'allongement de l'espérance de vie que de l'assurance contre le risque de succomber à une maladie grave.

Cela est social, tant pour les hôpitaux que pour les universités, est difficile, sinon impossible, à évaluer. Il n'en existe pas moins, et doit servir de cadre à toute réflexion sur les politiques publiques.

Quelle conclusion en tirer sur la gestion des entreprises publiques ? Si les anges existaient, omniscients et bienveillants, il suffirait de leur confier le pouvoir. Mais depuis 10 000 ans qu'on en cherche, on n'a trouvé que des diables, et il faut donc les mettre à se surveiller les uns les autres. Cela s'appelle l'équilibre des pouvoirs, c'est la grande découverte du XVIII^e siècle, et cela marche aussi bien pour les États que pour les universités et les hôpitaux, qui doivent donc être gouvernés par des conseils où sont représentées toutes les parties prenantes, et surtout pas par des patrons.

Ivar EKELAND est professeur d'économie.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Le prix de la biodiversité

Une analyse économique chiffre pour la première fois la valeur économique des « services rendus » par des écosystèmes en France.

Bernard CHEVASSUS-LOUBES

Le terme de biodiversité a été forgé en 1986 par le biologiste américain Edward Wilson pour exprimer d'un seul mot la multiplicité des formes de vie terrestre : diversité des espèces, des variétés, des gènes, des associations d'espèces, mais aussi interactions de toutes les composantes. À l'époque, on prend conscience, grâce aux collectes réalisées dans les forêts tropicales et dans les océans, qu'il y a encore beaucoup à découvrir, particulièrement parmi

les invertébrés et les micro-organismes. En même temps, cette biodiversité diminue du fait de l'expansion des activités humaines.

Certains font aujourd'hui remarquer qu'il est difficile de mesurer le rythme de l'érosion de la biodiversité, et que les extinctions d'espèces ont jalonné l'histoire de la Terre sans que la vie disparaisse. En réalité, il est possible de caractériser en un lieu donné l'état de la biodiversité et son évolution à partir d'indicateurs pertinents. De tels indicateurs ont été testés et validés par exemple

par le programme européen SEBI 2010 (*Streamlining European 2010 Biodiversity Indicators*). Il est aujourd'hui incontestable que l'érosion de la biodiversité se produit à un rythme très supérieur à celui des périodes passées, et que ce rythme s'est accéléré dans la seconde moitié du XX^e siècle.

On doit, en outre, considérer que cette érosion a des conséquences négatives pour l'humanité. Une façon de le démontrer consiste à évaluer la valeur économique des services rendus par la biodiversité. Ces

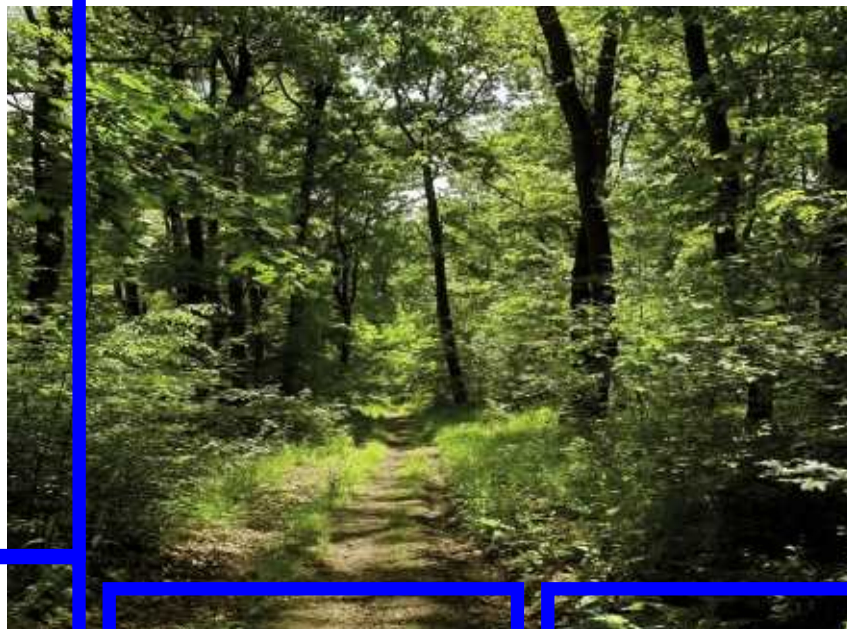
saire à la stabilité des sols, aux grands cycles biogéochimiques, elle est source de produits alimentaires, de molécules utilisables en chimie ou en pharmacie, de matières premières ; elle offre des zones de loisirs, ou stimule l'inspiration créative. Cette démarche de « monétarisation » de la nature a commencé à être popularisée en 1997 lorsque l'équipe de Robert Costanza, de l'Université du Maryland, a estimé par une série de calculs que les « services écosystémiques » de la planète valaient deux fois le produit brut mondial de l'époque.

Indiquons d'emblée que monétariser la biodiversité n'implique pas d'en faire un produit soumis au libre marché ; des régulations sont possibles et nécessaires. Cette monétarisation, en revanche, a des avantages : il devient possible de mesurer économiquement l'impact écologique des aménagements ; on peut aussi chiffrer le prix de l'infraction.

Actuellement, l'analyse économique fournit un cadre théorique et méthodologique suffisamment élaboré pour réaliser de telles estimations. On peut accorder aux services associés aux écosystèmes une valeur d'usage, à plus ou moins long terme (prélèvement de bois, contribution au cycle du carbone, valeur récréative, par exemple). Mais il faut considérer également leur valeur de non-usage, le fait que les gens accordent une valeur au fait même que la biodiversité existe, même s'ils n'en bénéficient pas. Les estimations de valeurs sont alors plus incertaines.

MONÉTARISER LA BIODIVERSITÉ n'est pas la livrer au libre marché.

Il est primordial de commencer par élaborer des valeurs de référence valables à l'échelle d'un territoire donné. C'est ce qu'a réalisé pour la France le groupe de travail que j'ai présidé pour le Centre d'analyse stratégique, en combinant les connaissances écologiques, juridiques et socio-économiques. Nous avons évalué la valeur d'usage de la biodiversité « ordinaire », celle qui n'a pas de valeur intrinsèque pour des raisons de rareté, de caractère patrimonial, etc. Pour cela, nous avons considéré les ser-



vices rendus par divers écosystèmes, selon la classification proposée par les Nations unies dans leur « Évaluation des écosystèmes pour le millénaire ».

En particulier, nous estimons que la valeur des écosystèmes forestiers, en France métropolitaine, est dans une moyenne de 970 euros par hectare et par an. Cette moyenne repose sur une estimation des divers services rendus par la forêt : prélèvement de bois et autres produits forestiers (hors gibier), fixation et stockage du carbone, rôle dans la qualité de l'eau (par exemple, filtration) et services récréatifs (promenades, chasse). En revanche, la protection contre l'érosion et les crues, ou les effets sur la santé n'ont pas été évalués, faute de données pertinentes. Autre résultat, les prairies utilisées de manière extensive ont une valeur minimale estimée à environ 60 euros par hectare et par an.

De telles valeurs monétaires pourraient freiner la perte de biodiversité à condition qu'elles soient prises en compte. Par exemple, la rémunération des services liés à ces espaces naturels pourrait rendre les élevages extensifs aussi rentables que les cultures intensives. De même, si un aménageur devait intégrer dans ses bilans le coût écologique de la construction d'une zone

d'activités ou d'une route, on pourrait éviter d'aménager des zones produisant beaucoup de services écologiques. En complément, la loi prévoit désormais la nécessité de compenser un impact écologique résiduel (provoqué malgré les mesures préventives) en restaurant un écosystème similaire.

L'analyse économique pourrait être élargie avec profit à d'autres écosystèmes. Elle est indissociable de la connaissance de l'état et de l'évolution de la biodiversité, malheureusement encore trop lacunaire. Une incertitude qui prend une acuité particulière face aux changements climatiques : les écosystèmes continueront-ils à produire les services dont nous dépendons ? La France recueille une part notable de la biodiversité mondiale, grâce à ses territoires d'Outre-mer. Elle porte ainsi une responsabilité majeure face à ces enjeux.

Bernard Chevassus-au-Louis est président du Conseil scientifique du Cirad.

Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Rapport du groupe de travail présidé par Bernard Chevassus-au-Louis. Centre d'analyse stratégique, avril 2009.

http://www.strategie.gouv.fr/article.php?id_article=980

QUESTIONS OUVERTES

Les essais cliniques : pourquoi sont-ils aujourd'hui critiqués ?

Les essais cliniques servent à l'évaluation des futurs médicaments ou des nouvelles procédures de soins. Ils doivent être conduits de façon éthique, fiable et indépendante. Comment faire pour que les médecins ne soient pas tiraillés entre leur obligation de soins et leur volonté de tester de possibles traitements ?

Simone BATEMAN

Aujourd'hui, les médecins admettent généralement que tout essai clinique doit être conduit selon des principes éthiques que l'Association médicale mondiale a rassemblés, en 1964, dans un code international, la Déclaration d'Helsinki. Certains de ces principes paraissent incontestables : par exemple, le fait que toute personne sollicitée pour faire partie d'un essai doit être convenablement informée des tenants et aboutissants de l'essai, et doit donner son consentement. Si l'application de ce principe soulève quelques difficultés dans certaines circonstances – tels les essais en situation d'urgence ou en milieu psychiatrique, cela ne remet pas en cause son bien-fondé.

En revanche, les principes régissant les essais contre placebo ont fait ces dernières années l'objet de vives controverses, surtout à l'occasion de la grande révision de la Déclaration d'Helsinki qui eut lieu en 2000. Dans ces essais, certaines personnes reçoivent le médicament à tester, les autres une substance neutre, dénuée de tout effet thérapeutique – hors l'effet placebo lui-même, dont on a montré qu'il peut représenter jusqu'à 30 pour cent, voire plus, de l'efficacité thérapeutique. Les objections à certains principes sont parfois d'ordre scientifique ou concernent des questions éthiques dans des contextes spécifiques, mais elles soulignent

toutes les intérêts contradictoires que soulève la recherche en milieu médical.

Les grands débats autour des rédactions successives de la Déclaration d'Helsinki (la dernière date de 2008) témoignent, malgré les polémiques, d'un souci partagé par la communauté médicale internationale de trouver un accord sur les bonnes pratiques de recherche que ce qui n'a pas toujours été le cas.

En 1946, un article publié par Henry Knowlton Beecher (1904-1976) dans la revue médicale *The New England Journal of Medicine* fit sensation. Anesthésiste en chef à l'Hôpital général du Massachusetts à Boston, il présentait, sans nommer les équipes en cause, plusieurs protocoles de recherche clinique qu'il considérait comme moralement problématiques, bien que leurs résultats eussent été publiés dans des revues prestigieuses. Cet article, qu'il a eu du mal à publier, lui valut d'être vivement critiqué par ses pairs pour manquement à la discrétion d'usage dans la profession.

Toutefois, les médecins américains commencèrent à prendre conscience que la recherche clinique occupait une place croissante dans la prise en charge des malades en milieu hospitalier, et qu'elle modifiait profondément les conditions d'exercice de la médecine. D'autres révélations suivirent, moins discrètes quant à l'identité des institutions et des chercheurs incriminés. Dans presque tous les cas, les dérapages de

conduite de ces médecins-chercheurs concernaient une catégorie de sujets ou de patients vulnérables – personnes âgées, enfants handicapés mentaux, personnes noires.

Éviter les dérives

Certains médecins-chercheurs ont été accusés de ne pas avoir respecté la conduite à tenir lors de toute expérimentation sur des sujets humains. En effet, les protocoles de recherche incriminés violaient en plusieurs points le code de conduite établi en 1947 lors du procès de Nuremberg, qui s'inspirait, entre autres, d'un code déontologique moins connu, arrêté par l'Association médicale américaine (AMA) en 1946 : *Principles of Ethics Concerning Experimentation with Human Beings* (principes éthiques concernant l'expérimentation sur l'être humain).

Le déroulement des différents procès a mis en évidence que le code de 1947 n'était pas assez précis pour constituer une référence éthique efficace dans un contexte où la recherche thérapeutique était en pleine évolution. Une nouvelle rédaction de ces principes, la Déclaration d'Helsinki, a été élaborée en 1964 dans le cadre de travaux de l'Association médicale mondiale (WMA). Cette version a fait depuis l'objet de six révisions ; la dernière date d'octobre 2008.

Ainsi, le souci de mieux contrôler les activités de recherche en milieu hospitalier a

abouti à la création d'instances nouvelles qui avaient pour objectif d'évaluer les protocoles de recherche clinique, cherchant par là à prévenir les dérapages et à limiter tout recours à l'appareil judiciaire.

Dès lors, comment se fait-il que resurgisse aux États-Unis un débat relatif à l'expérimentation sur l'homme, alors que des mesures draconiennes ont été prises très rapidement, avec un réel suivi, par des instances de contrôle locales et fédérales ? C'est que de nouvelles révélations ont été faites à partir de 1999, notamment à l'occasion du décès en septembre de cette année-là d'un jeune homme de 18 ans, Jesse Gelsinger, pendant un essai de thérapie génique à l'Université de Pennsylvanie. L'affaire la plus récente date de mai 2005, et concerne des essais sur des enfants séropositifs pour le VIH placés dans des familles d'accueil, statut qui a permis aux chercheurs de contourner les procédures de demande de consentement auprès du parent ou du représentant légal.

Certains dénoncent l'entorse à la règle du consentement, mais d'autres rétorquent que l'impossibilité d'obtenir l'accord des parents empêche les enfants séropositifs de recevoir les traitements les plus novateurs, accessibles uniquement dans le cadre de protocoles expérimentaux. La norme de protection au nom du principe de respect de la personne, qui primait dans le débat sur l'expérimentation sur l'homme dans les années 1970, tend aujourd'hui à se transformer en débat sur l'accès équitable de tous aux traitements de pointe.

Recherche ou thérapeutique ?

Cette nouvelle série de révélations a fait ressortir les conditions difficiles dans lesquelles les institutions qui mènent ces recherches appliquent la réglementation en vigueur : manque de crédits et de personnel à temps plein pour traiter les nombreux dossiers soumis à évaluation ; manque de formation appropriée des médecins qui conduisent des essais cliniques, etc.

Mais, au-delà, surgit un débat éthique quant aux frontières censées être étanches entre la recherche et la thérapeutique. La

grande révision de la Déclaration d'Helsinki, datant d'octobre 2000, en est devenue la toile de fond. Pour l'essentiel, ce débat traite des conditions dans lesquelles des patients sont sollicités pour participer à un essai, mais aussi de la validité médicale et morale de certaines stratégies de recherche, et en particulier des essais dans lesquels des patients sont placés sous placebo.

Dans cette discussion, la notion de « compréhension erronée de la thérapeutique » (en anglais *therapeutic misconception*) tient une place centrale. Proposé en 1982 par les psychiatres Paul Appelbaum et Loren Roth, et le sociologue Charles Lidz, ce terme désigne le fait que les participants à un essai clinique se méprennent souvent sur la nature proprement expérimentale des traitements et des examens qui leur sont proposés dans le cadre d'un protocole. Des études menées depuis montrent que cette méprise est assez répandue, et cela parfois quelle que soit la qualité de l'information fournie.

P. Appelbaum et ses collègues soulignent en particulier deux difficultés pour les malades : ils comprennent mal en quoi un essai clinique diffère d'une situation de soins ordinaires et comment le protocole d'un essai s'appliquera à leur propre cas. Même quand ils reçoivent des explications claires et adaptées, certains patients sont incapables de

L'AUTEUR



Simone BATEMAN est sociologue au Centre de recherche sens, éthique, société (CERSES) – UMR 8137 CNRS Université Paris Descartes.

COMMENT EXPLIQUER aux sujets inclus dans des essais cliniques les enjeux de la recherche en cours ? Les malades peuvent croire qu'ils reçoivent le meilleur traitement existant et ne pas comprendre que l'essai clinique en cours vise à évaluer l'efficacité (ou l'inefficacité) d'une nouvelle molécule ou d'un nouveau protocole. Depuis des aménagements de la Déclaration d'Helsinki en 2000, les personnes en fin de vie peuvent, si elles l'acceptent, recevoir des substances dont on ignore si elles ont ou non une réelle efficacité.



© Corbis/Photo Images

saisir la logique de l'essai clinique, notamment les notions d'attribution aléatoire des traitements par tirage au sort (on parle d'essai randomisé) et de conduite d'un essai en double aveugle (ni le patient ni le médecin ne savent quel est le traitement administré). D'autres patients comprennent partiellement ces informations et sont même capables de les restituer, mais ils ne réalisent

pas à laquelle il appartient : l'individu s'éclipse devant le groupe.

Bien évidemment, le médecin dont les patients participent à un essai est tiraillé entre ses obligations envers eux et la rigueur qu'exige le travail scientifique. En tant que médecin, il doit veiller à ce que la participation de ses patients à l'essai ne soit pas contre-indiquée ; et il doit rester attentif pendant la conduite de l'essai à tout signe indiquant qu'un patient encourt des risques supplémentaires inacceptables.

Il faut aussi se demander si l'essai est comparable avec les meilleures méthodes diagnostiques, thérapeutiques, ou de prévention en usage. Cela n'exclut ni le recours au placebo ni l'absence d'intervention dans les études pour lesquelles il n'existe pas de méthode diagnostique, thérapeutique, ou de prévention éprouvée. »

Cette disposition, qui conforte la position clinique équilibrée, a été pourtant loin de faire l'unanimité, et a abouti à une note de clarification, qui précise deux conditions dans lesquelles un essai avec témoins sous placebo peut être éthiquement acceptable : « Lorsque pour des raisons méthodologiques impérieuses et scientifiquement solides, il n'existe pas d'autres moyens qui permettent de déterminer l'efficacité ou l'innocuité d'une méthode prophylactique, diagnostique ou thérapeutique ; ou lorsqu'une méthode prophylactique, diagnostique ou thérapeutique est utilisée à l'essai pour une affection bénigne et que la participation à l'essai n'expose pas à des risques supplémentaires de dommages significatifs ou durables. »

Cette note rouvre ainsi le débat sur les tensions entre les devoirs de thérapeute et ceux de chercheur, puisqu'elle affirme qu'il peut y avoir de bonnes raisons scientifiques pour avoir recours au placebo, même lorsque des traitements efficaces existent déjà. Pour les tenants de cette position, la distinction entre recherche et thérapeutique est moralement pertinente, et il y a de bonnes raisons éthiques, mais aussi méthodologiques de ne pas se limiter aux seules comparaisons de traitements actifs. Toutefois, « Le plus grand soin doit être apporté afin d'éviter tout abus de cette option ».

Comment évaluer les innovations ?

Par ailleurs, la révision de la Déclaration d'Helsinki de 2000 offre la possibilité aux médecins de recourir, dans certaines circonstances et avec l'accord du patient, un procédé dont les risques et les bénéfices n'ont pas encore été convenablement évalués.

« Lorsqu'au cours d'un traitement, les méthodes établies de prévention, de diagnostic ou de thérapeutique se révèlent inexistantes ou insuffisamment efficaces,

UNE PERSONNE MALADE

mais aussi son médecin attendent souvent beaucoup trop ? d'une offre de soins en constant renouvellement.

pas que le traitement qu'ils recevront sera choisi au hasard, et que leur médecin ignorera lequel des traitements leur incombera.

Il existe une explication à ces méprises fréquentes : suggèrent P. Appelbaum et ses collègues, les malades qui participent à un essai clinique auraient beaucoup de difficultés à accepter que l'objectif premier du traitement prescrit ne consiste pas à leur apporter un bénéfice thérapeutique immédiat et adapté à leur cas particulier, mais qu'il s'agit de tester une substance nouvelle ou administrée dans une nouvelle indication. D'où l'idée qu'une distinction nette entre recherche et thérapeutique est nécessaire pour s'assurer que les essais cliniques puissent être menés dans le respect des principes éthiques fondamentaux de la recherche sur l'être humain.

Pour ceux qui défendent cette distinction, la thérapeutique répond au devoir primordial du médecin qui consiste à proposer un traitement personnalisé à son patient. La recherche, en revanche, a pour objectif de produire une connaissance sur le meilleur traitement possible pour un groupe de patients ayant une même pathologie. Pour que cette connaissance soit scientifiquement valable, le médecin ne peut pas choisir le traitement qu'il pense être le mieux adapté à chaque patient ni modifier les doses administrées. Pour que le malade puisse prendre une décision éclairée, il doit comprendre que son traitement sera adapté non pas au cas particulier qu'il présente, mais à ceux définis pour la catégorie de

patients à laquelle il appartient : l'individu s'éclipse devant le groupe. Bien évidemment, le médecin dont les patients participent à un essai est tiraillé entre ses obligations envers eux et la rigueur qu'exige le travail scientifique. En tant que médecin, il doit veiller à ce que la participation de ses patients à l'essai ne soit pas contre-indiquée ; et il doit rester attentif pendant la conduite de l'essai à tout signe indiquant qu'un patient encourt des risques supplémentaires inacceptables. Mais certains pensent que recherche et thérapeutique sont difficilement conciliables, d'autres soutiennent le contraire. Ils avancent, à la suite du bioéthicien canadien Benjamin Freedman, la notion de « position clinique équilibrée ». Que signifie cette notion ? Un médecin-chercheur peut demander à son patient de participer à un essai clinique randomisé dans la mesure où il ignore lequel des deux médicaments (celui déjà disponible ou le nouveau) est le plus efficace. Son engagement envers son patient n'est pas incompatible avec son rôle de chercheur, puisqu'il lui demandant de participer à l'essai clinique il lui donne peut-être une chance de recevoir un meilleur traitement.

Les difficultés soulevées par cette « position clinique équilibrée » sont particulièrement vivantes dans les débats sur l'acceptabilité des essais contre placebo. En effet, pour les tenants de cette position, il n'est pas moralement acceptable de soumettre un patient à un essai dont l'une des deux substances testées serait moins efficace qu'un traitement existant. Seuls les essais qui comparent un traitement dont l'efficacité est inconnue contre le meilleur traitement connu pour cette pathologie seraient acceptables. Autrement dit, le recours au placebo n'est éthiquement acceptable qu'à la seule condition qu'il n'existe pas de « meilleur traitement connu ».

Cette position, aujourd'hui largement répandue dans les pays industrialisés, a été inscrite dans le paragraphe 29 de la Déclaration d'Helsinki lors de sa révision en 2000 : « Les avantages, les risques, les contraintes et l'efficacité d'une nouvelle méthode doivent être évalués par com-

le médecin, avec le consentement éclairé du patient, doit pouvoir recourir à des méthodes non éprouvées ou nouvelles s'il juge que celles-ci offrent un espoir de sauver la vie, de rétablir la santé ou de soulager les souffrances du malade. Ces mesures doivent, dans toute la mesure du possible, faire l'objet d'une recherche destinée à évaluer leur sécurité et leur efficacité. Toute nouvelle information sera consignée et, le cas échéant, publiée. Les autres recommandations appropriées énoncées dans la présente déclaration s'appliquent. »

Cette disposition concerne le plus souvent des protocoles dits compassionnels destinés au traitement des malades en fin de vie, atteints par exemple du sida ou d'un cancer en phase terminale, mais elle peut aussi concerner des interventions expérimentales sur des organes vitaux. Mais comment s'assurer que le patient et son entourage comprennent correctement la proposition qui lui est faite ? S'agit-il de tester un procédé expérimental non encore validé, ou s'agit-il d'un tout nouveau traitement offrant au malade un dernier espoir ?

Peut-on tester avant d'avoir validé ?

Les ambiguïtés sur la nature expérimentale d'un procédé s'aggravent lorsque l'on quitte le cadre très codifié de l'essai clinique pour celui, plus ou, des innovations biomédicales et chirurgicales, dont les exemples plus récents sont la thérapie génique et les greffes de la face et de la main. Un exemple extrême concerne le procédé de fécondation *in vitro* connu sous le sigle d'ICSI, où un spermatozoïde est directement injecté dans un ovocyte. En fait, ce procédé est issu d'un accident de manipulation. La réussite inattendue de ce procédé a conduit à sa très large diffusion, avant même que la preuve de son innocuité, à moyen et à plus long terme, n'ait été établie. Les problèmes que soulèvent ces innovations thérapeutiques font l'objet de peu de recherches, précisément parce qu'elles sont souvent présentées comme des traitements d'avant-garde. Ainsi, le débat concernant les frontières entre recherche et thérapie reste d'actualité avec le risque, cependant,

Qu'est-ce qu'un essai clinique ?		
Les essais cliniques sont des études d'un médicament ou d'un protocole, menées auprès de volontaires sains et ensuite de malades selon une méthodologie rigoureuse. Ils permettent d'étudier l'efficacité et la sécurité d'emploi de la nouvelle substance (ou du protocole), et d'identifier les effets indésirables. Ces essais s'échelonnent sur trois phases jusqu'à l'obtention de l'autorisation de mise sur le marché, et sont toujours précédés d'une phase préclinique pour tester sa sécurité d'emploi chez l'animal. Ils sont précédés d'une phase de surveillance prolongée, souvent nommée phase 4, où l'on suit pendant longtemps les	effets de la substance sur une vaste population. Au cours de la phase 1, on teste la tolérance de la molécule administrée à des doses croissantes sur un petit groupe de volontaires sains. On évalue grossièrement son activité pharmacologique. Au cours de la phase 2, on teste la tolérance sur un petit nombre de patients hospitalisés et on cherche à déterminer la dose optimale pour obtenir le meilleur effet thérapeutique et le moins d'effets secondaires. Durant la phase 3, on compare un traitement existant ou un placebo pour vérifier l'efficacité et la tolérance. L'essai est conduit	sur quelques centaines, voire plusieurs milliers de personnes. On établit des précautions d'emploi et on surveille les risques d'interaction avec d'autres produits. Quand les résultats sont satisfaisants, l'Agence française de pharmacologie, si elle est avérée, le médicament obtient l'autorisation de mise sur le marché. Après le début de la commercialisation, l'Agence française de pharmacologie, si elle est avérée, le médicament obtient l'autorisation de mise sur le marché. Après le début de la commercialisation, l'Agence française de pharmacologie, si elle est avérée, le médicament obtient l'autorisation de mise sur le marché. Après le début de la commercialisation, l'Agence française de pharmacologie, si elle est avérée, le médicament obtient l'autorisation de mise sur le marché.

de détourner l'attention des personnes impliquées. Le principal problème de l'essai clinique : informer le malade, quelle que soit sa situation, et le convaincre sur les points d'incertitude, et convenir avec lui de la meilleure façon de procéder.

Malgré la nouvelle rédaction de la Déclaration de Helsinki en 2008, la moralité des recherches contre placebo continue à faire l'objet de controverses, notamment lorsqu'il s'agit d'essais dans des pays en développement. Parfois on retrouve l'écho de ces débats dans l'évolution des textes législatifs et réglementaires de différents pays. Mais l'expérience américaine montre qu'il ne suffit pas d'avoir un cadre réglementaire pour garantir une pratique de recherche médicale acceptable. Il est nécessaire d'en savoir plus sur la façon dont ces textes sont reçus, compris et appliqués. Car une personne malade mais aussi son médecin attendent souvent beaucoup – trop ? – d'une offre de soins en constante renouvellement. Les conditions dans lesquelles une personne acceptera de se soumettre à une recherche médicale restent donc le point névralgique de tout système de soins qui bâtit son efficacité et sa fiabilité sur la preuve scientifique.

✓ BIBLIOGRAPHIE

- S. Joffe et F. Miller, *Bench to bedside: mapping the moral terrain of clinical research*, *Hastings Center Report*, vol. 38, n° 2, pp. 30-42, 2008. Numéro essentiellement consacré à la protection des personnes soumises à des recherches.
- J. Kimmelman, *The therapeutic misconception and 25 treatment research, and confusion*, *Hastings Center Report*, vol. 37, n° 6, pp. 36-42, 2007.
- L. Freedman et Ross, *Children in medical research. Balancing protection and access: has the pendulum swung too far?*, *Perspectives in Biology and Medicine*, vol. 47, n° 4, pp. 519-36, 2004.
- E.G. Miller et H. Brody, *What makes placebo-controlled trials unethical*, *The American Journal of Bioethics*, vol. 2, n° 2, pp. 3-9, 2002. Numéro essentiellement consacré aux essais contre placebo.

VRAI OU FAUX

L'éléphant a-t-il une bonne mémoire ?

Oui, sa mémoire est comparable à celle des autres mammifères dotés d'un gros cerveau et vivant des dizaines d'années, à savoir les grands singes et l'homme.

Bénédicte SALTHUN-LASSALLE

Savez-vous avez une bonne mémoire, elle a probablement déjà été comparée à celle d'un éléphant. Mais les éléphants ont-ils une mémoire phénoménale ? Oui. Les éléphants ont une mémoire proche de celle des dauphins, des grands singes et de l'homme. Comme ces mammifères, ils peuvent se souvenir d'un homme qu'ils ont côtoyé des années auparavant.

Un souvenir vieux de 20 ans

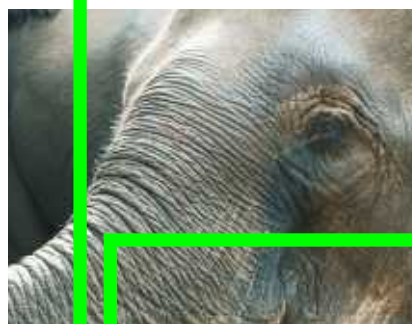
Les éléphants n'oublient jamais un congénère. Par exemple, on a montré qu'un éléphant avait reconnu un autre éléphant qu'il avait croisé dans un cirque pendant quelques mois, 23 ans plus tôt ! Qui plus est, ils reconnaîtraient et se souviendraient de tous les membres de leur groupe. Les scientifiques ont évalué cette mémoire en plaçant une trentaine d'échantillons d'urine dans plusieurs endroits et ils ont observé le comportement de femelles ; celles-ci ont vérifié chaque échantillon avec leur trompe – qui leur renseigne sur la nature, l'odeur et la comestibilité de toute chose – et elles ont eu une attitude caractéristique devant les extraits ne correspondant à aucun membre de leur groupe et qui ne devaient donc pas se trouver sur leur territoire.

Cette mémoire remarquable est nécessaire à leur survie. Ainsi, les éléphantesses matriarches – qui dirigent une famille – ont des connaissances sociales importantes utiles à l'ensemble du groupe. Des chercheurs américains ont suivi des groupes d'éléphants ayant une matriarche âgée de

55 ans – les éléphants vivent entre 50 et 60 ans – se méfiant plus souvent d'un éléphant inconnu que ceux dont la matriarche n'a que 35 ans. La cause en serait que les premières savent qu'un étranger peut perturber le groupe et nuire aux nouveau-nés, alors que les éléphants dirigés par une femelle plus jeune – qui n'aurait jamais rencontré cette situation – l'ignorent.

Les éléphants sont aussi capables de mémoriser les trajets qu'ils empruntent chaque année, et ils se souviennent des périodes où certains végétaux et fruits parviennent à maturité : ils se déplacent et parcourent parfois des centaines de kilomètres juste pour les manger au bon moment.

Des scientifiques ont étudié trois troupeaux d'éléphants pendant une sécheresse



© Shutterstock / Ailyna Andrusenko

importante dans un parc de Tanzanie en 1999 ; ils ont montré que non seulement les éléphants se reconnaissent entre eux, mais qu'ils se souviennent aussi de certains trajets qui conduisent à d'autres sources de nourriture et d'eau. Les deux groupes de parcs yermes avant des matriarches âgées de 38 et 45 ans ont quitté le site desséché, probablement pour aller boire et manger sur d'autres territoires, alors que celui

ayant une matriarche plus jeune, âgée de 33 ans, est resté sur place. Seize des 81 bébés nés dans ce parc cette année-là sont morts en moins de neuf mois, soit une mortalité dix fois plus importante que dans des conditions normales : dix bébés appartenant au groupe qui est resté dans le parc où l'eau et la nourriture manquaient.

Les éléphants plus vieux se seraient souvenus d'une autre grande sécheresse qui avait eu lieu dans le parc entre 1958 et 1961 : ils savaient comment survivre en allant chercher ailleurs de quoi se nourrir. En revanche, tous les éléphants restés dans le parc, les séchés étaient trop jeunes pour se souvenir de la sécheresse précédente.

Comme l'homme et les grands singes, les éléphants ont une bonne mémoire spatio-temporelle et sociale ; elle leur permettrait de survivre et de transmettre leurs connaissances à leur descendance.

Mais les éléphants ont d'autres capacités : cognitives dites supérieures. Depuis 2006, on pense qu'ils pourraient se reconnaître dans un miroir, ce qui est un prérequis à la conscience de soi. De plus, ils communiqueraient par des sons de basses fréquences, inaudibles par l'homme. Toutefois, si cet animal est social – les éléphants s'entraident et les femelles s'occupent longtemps des petits –, les cimetières ne sont qu'une légende ; en revanche, si un éléphant est trouvé immobile sur le sol, ses congénères l'« enterrent » : c'est-à-dire le recouvrent de poussière et de branchages.

Bénédicte Salthun-Lassalle est journaliste à Pour la Science.

✓ STATINES : MIRACLE OU IMPOSTURE ?

J'ai été surpris par l'article *Les statines : de la moissure aux médicaments* (*Pour la Science* n° 379, mai 2009). Les statines sont loin d'être les molécules miraculeuses presque dénuées d'effets secondaires que vante cet article. Elles ne réduisent pas la mortalité totale ni celle due à des maladies cardio-vasculaires, et elles seraient toxiques pour les muscles et activeraient des cancers latents (en 2003, on retira du marché la cévastatine après une cinquantaine de décès par rhabdomyolyse – une importante destruction du tissu musculaire).

Jean-Pierre Duboc, Lyon

→ RÉPONSE DE CATHERINE FIÉVET,
Institut Pasteur de Lille, INSERM U545,
Université Lille Nord

De nombreuses publications montrent sans aucune ambiguïté l'efficacité des statines sur la mortalité et la morbidité cardio-vasculaires (il y a notamment deux analyses récentes effectuées à partir des grands essais cliniques et dont les résultats, difficilement critiquables, ont été publiés dans *The Lancet*). Un autre article convaincant souligne l'efficacité comparative des différentes statines pour prévenir la mortalité cardio-vasculaire. En outre, d'après les articles publiés, il est clair que les patients traités par statines ne présentent pas plus de risques de cancers, de rhabdomyolyse – une importante destruction du tissu musculaire – ou d'autres effets indésirables. En ce qui concerne les problèmes liés à la consommation de cévastatine, la FDA a montré que les inconvénients étaient spécifiques de cette statine.

On a aujourd'hui montré que la toxicité musculaire, notamment la rhabdomyolyse, reste en effet indésirable rare de toutes les statines encore disponibles sur le marché, et que cette toxicité dépend probablement de la dose. Toutefois, les statines ne corrigent pas tout et ne sont pas un médicament miracle. Souvent, c'est tout le profil

lipidique qui est à considérer, et il y a d'autres paramètres que le seul LDL cholestérol à réguler, tels des triglycérides élevés à diminuer et des concentrations basses de HDL cholestérol à augmenter. Sur ces paramètres, les statines sont inefficaces et c'est pourquoi d'autres thérapeutiques associées sont aujourd'hui préconisées.

✓ RÉPONSE PUBLIQUE LA RECHERCHE

On ne peut que confirmer les constatations faites par Pabla Jensen dans son *Point de vue* sur *La vulgarisation, le chercheur et le citoyen* (*Pour la Science*, n° 379, mai 2009, pp. 20-21). Bien que la diffusion des résultats de la recherche soit, sur le papier, encouragée par le CNRS, l'expérience montre que les activités de vulgarisation ne sont absolument pas prises en compte par les instances qui décident de l'avancement des chercheurs – alors que les activités administratives le sont largement, presque autant en fait que la publication d'articles dans des revues internationales, ce qui est assez paradoxal. La vulgarisation n'est pas ouvertement désapprouvée, elle est plutôt complètement ignorée. Cela tient sans doute au fait que comme le remarque P. Jensen, « cinq pour cent des chercheurs assurent la moitié des actions de vulgarisation au CNRS », et que par conséquent, la majorité des membres des commissions d'évaluation de l'activité des chercheurs ne pratiquent pas eux-mêmes la vulgarisation et n'en ont donc aucune expérience.

Cet écart pour la vulgarisation n'a pas toujours été aussi marqué. Dans les années 1980, il existait au Comité national de la recherche scientifique une section interdisciplinaire intitulée *Information scientifique et diffusion*, dont j'ai fait partie, par laquelle les chercheurs qui le souhaitaient pouvaient être évalués, et éventuellement promus, au titre de leurs activités de vulgarisation. Cette section n'existe plus aujourd'hui, alors qu'il est toujours possible d'être promu pour activité de « gestion de la recherche ». P. Jensen a raison de sou-

haiter que les activités de vulgarisation soient de nouveau incluses dans les critères d'évaluation des chercheurs et des unités de recherche, mais encore faudrait-il qu'elles le fussent réellement et concrètement, pas simplement sous forme de déclarations d'intention non suivies d'effet.

Le résultat de ce désintérêt du CNRS pour la vulgarisation se fait cruellement sentir. Il est difficile d'imaginer un organisme de recherche aussi important communiquant aussi mal ses résultats scientifiques qu'obtiennent ses chercheurs, le faisant de façon passablement confidentielle et souvent à usage interne plutôt que pour l'extérieur. Il faut dire d'ailleurs que les autres acteurs de la recherche française, et notamment les universités, ne font guère mieux. Le contraste avec ce qui se fait dans d'autres pays comparables à la France est frappant. Quoi qu'il en soit, dès lors à ce que la recherche française jouisse d'une mauvaise réputation totalement imméritée, d'ailleurs) auprès de ceux qui, faute d'information, ne sont pas en mesure d'apprécier ses réussites – et cela, on peut le constater, jusque dans les plus hautes sphères de l'État.

Eric Buisson, directeur de recherche au CNRS, Paris

✓ LA MORT DES ABEILLES FRANÇAISES

Concernant l'article *Sauvons les abeilles* (*Pour la Science* n° 379, mai 2009), je me demande combien il y a d'abeilles ou de colonies en France et donc combien meurent par an ?

Lucien Bernaud, Paris

→ RÉPONSE DE YVES LE CONTE,
Directeur de recherche INRA

Il y a environ 1,3 million de colonies d'abeilles en France, avec entre 20 000 et 60 000 ouvrières par colonie. Si 30 pour cent d'entre elles meurent par an, cela représente 390 000 colonies d'environ 40 000 abeilles, soit 15,6 milliards d'abeilles qui meurent par an. Mon calcul est approximatif.

Savoir QUAND s'arrêter

Theodore Hill

Toute décision importante doit être prise. Choisir le meilleur moment pour agir ou pour se retirer est crucial. Quand une entreprise d'informatique élabore une nouvelle version de son logiciel phare, elle doit décider quand s'arrêter de la parfaire et la mettre sur le marché. Lorsqu'un cyclone s'approche, les autorités doivent déterminer quand il est temps de commencer à évacuer. Un mauvais choix peut se solder par un désastre. Napoléon en a fait la triste expérience après avoir envahi la Russie. Avec des conséquences moins graves, nous sommes constamment confrontés à des décisions d'arrêt, que nous cherchions une meilleure place de stationnement, répondions à une offre d'emploi ou préparions notre départ à la retraite.

Tous ces problèmes s'inscrivent dans un même cadre : un processus évolue dans le temps, on faisant intervenir une part d'aléas et, on se fondant seulement sur l'information disponible, on doit décider comment maximiser la récompense ou minimiser le coût. Parfois, on dispose de peu d'information sur la suite des événements. Dans d'autres cas, l'information abonde. Personne ne prédit l'avenir avec une certitude absolue, mais, heureusement, la puissance de la théorie des probabilités nous permet de faire le bon choix.

L'importance des probabilités est assez récente. L'un des premiers écrits sur les probabilités, *De ludo aleae* de l'Italien Jérôme Cardan, datant de 1564 et qui dut attendre un siècle avant d'être publié, analyse essentiellement les jeux de dés. On attribue généralement les débuts mathématiques des probabilités à un échange de lettres en 1654 entre Blaise Pascal et Pierre de Fermat. Eux aussi s'intéressaient aux probabilités en relation avec les lancers de dés, pour déterminer par exemple s'il est raisonnable de parier un contre un qu'un double six se réalisera en 24 lancers de deux dés non pipés. Certains soutenaient que oui, mais la véritable probabilité d'obtenir un double six en 24 lancers est d'environ 49,1 pour cent.

Cette correspondance a inspiré d'importantes avancées réalisées par d'autres mathématiciens au XIX^e siècle. Cependant, il a fallu attendre longtemps une définition suffisamment précise des probabilités pour être utilisable efficacement en mathématiques ou dans les sciences expérimentales. Ce n'est qu'en 1933 que le mathématicien russe Andreï Kolmogorov a donné aux probabilités un fondement axiomatique formel.

L'histoire des problèmes d'arrêt optimal, une branche de la théorie des probabilités, a également pour point de départ

les jeux de hasard. L'une des premières découvertes est due au mathématicien anglais Arthur Cayley. En 1875, il trouva une stratégie d'arrêt optimal pour l'achat de billets de loterie, stratégie à laquelle on trouva peu à peu des applications plus larges.

Durant la Seconde Guerre mondiale, l'Américain d'origine hongroise Abraham Wald et d'autres mathématiciens ont développé le domaine de l'analyse séquentielle statistique pour aider les militaires et les industriels confrontés à des paris stratégiques faisant intervenir des quantités énormes d'hommes et de matériel. Peu après la guerre, l'Américain Richard Bellman a inventé la programmation dynamique afin d'obtenir des stratégies optimales pour de nombreux autres problèmes d'arrêt. Dans les années 1970, la théorie de l'arrêt optimal s'est élevée au rang d'outil essentiel dans la finance quand Fischer Black et Myron Scholes ont découvert une formule pionnière pour évaluer les actions boursières. Cela a transformé les marchés financiers du monde entier, et a valu à M. Scholes et son collègue Robert Merton le prix Nobel 1997 d'économie (Black était décédé entre-temps).

La formule de Black-Scholes est aujour- d'hui au fondement de l'évaluation des options financières, et les outils d'arrêt optimal qui la sous-tendent ont permis



Dans les jeux de hasard, les mathématiques indiquent parfois quel est le meilleur moment pour s'arrêter de jouer.

Ces stratégies d'arrêt optimal s'appliquent aussi dans d'autres situations.

de recherche très actif. Mais même les outils élémentaires de la théorie de l'arrêt optimal offrent déjà des solutions puissantes, pratiques et parfois surprenantes.

Supposons que vous soyez une femme ayant décidé de se marier, et que pour sélectionner l'homme de votre vie, vous ayez un entretien avec un maximum de 100 candidats. Les entretiens sont conduits dans un ordre aléatoire, et vous n'avez aucune information sur les candidats auxquels vous n'avez pas encore parlé. Après chaque entretien, vous avez le choix entre épouser le prétendant ou perdre à jamais la possibilité de le faire (voir la figure 1). Si vous ne vous êtes pas mariée après le 99^e entretien, alors vous devrez épouser le 100^e candidat. L'objectif est évidemment d'épouser le meilleur des 100 prétendants.

Choisir le bon prétendant

Le problème a une longue et riche histoire dans la littérature mathématique, où on le rencontre sous toutes sortes de noms : problème du mariage, de la secrétaire, de la princesse, de la dot, du meilleur choix... Certes, vous pouvez sélectionner le meilleur époux avec une probabilité d'au moins 1/100 en épousant tout simplement le 100^e candidat. Mais pour

avez-vous faire mieux ? En fait, il existe une règle garantissant que vous épouserez le meilleur de tous les prétendants plus d'une fois sur trois. Et cette règle peut se transposer à d'autres scénarios.

En 1940, dans l'armée de l'air américaine durant la guerre du Vietnam, John Elton, aujourd'hui mathématicien à l'Institut de technologie de Géorgie, avait transformé le problème du mariage en une combine pour se faire de l'argent à la caserne. J. Elton demandait à ses camarades aviateurs d'inscrire 100 nombres différents, positifs ou négatifs, aussi grands ou petits qu'ils voulaient, sur 100 bouts de papier, de les mettre à l'envers sur une table et de les mélanger. Il pariait avec eux qu'en retournant les papiers un par un, il saurait s'arrêter sur le plus grand nombre de tous les retourner.

J. Elton avait convaincu ses camarades qu'il était « évident » que ses chances de gagner étaient infimes et leur demandait dix dollars s'il gagnait, tandis qu'il leur offrait un dollar s'il perdait. Les parieurs se bousculaient. Même si J. Elton perdait presque les deux tiers des fois, il en gagnait deux fois plus d'argent. Et avec cette mise de dix contre un, il amassait une belle somme. Comment est-ce possible ?

Tout d'abord, il faut savoir qu'il existe une stratégie très simple pour gagner dans

L'ESSENTIEL

✓ Le problème de l'arrêt optimal consiste à déterminer quand il convient d'interrompre un processus faisant intervenir une part de hasard, afin de maximiser un gain moyen ou minimiser un coût moyen.

✓ Les mathématiciens ont déterminé des stratégies optimales dans de nombreux cas de figure, par exemple pour un jeu consistant à s'arrêter sur le maximum de points affichés par un dé lancé cinq fois de suite.

✓ Mais même certaines questions simples sur des tirages à pile ou face sont encore non résolues.

© Shutterstock



1. DANS LE PROBLÈME DU MARIAGE, une personne auditionne un à un les candidats. À chaque audition, soit elle épouse le prétendant, soit elle l'élimine définitivement. Une stratégie permet de choisir le meilleur candidat avec une probabilité assez élevée : auditionner environ un tiers des prétendants, puis s'arrêter sur le premier prétendant qui soit meilleur que ceux déjà passés.

✓ SUR LE WEB

T. Ferguson, *Optimal stopping and applications* : www.math.ucla.edu/fftom/Stopping/Contents.html

✓ BIBLIOGRAPHIE

F. T. Bruss et G. Louchard, *The odds algorithm based on sequential updating and its performance*, *Advances in Applied Probability*, vol. 41, n° 1, pp. 131-153, 2009.

N. Gauvrit, *Vous avez dit hasard ?*, Belin, 2009.

S. Jacka et al., *Optimal stopping with applications*, numéro spécial de *Stochastics*, vol. 79, n° 1, 2007.

F. T. Bruss, *Le bon choix... raisonné*, *Pour la Science*, n° 335, pp. 56-61, septembre 2005.

F. T. Bruss, *From the odds to one and stop*, *Annals of Probability*, vol. 28, pp. 1384-1391, 2000.

T. Hill et U. Angel, *Minimax optimal stop rules and distributions in marriage problems*, *Annals of Probability*, vol. 19, pp. 142-153, 1992.

plus d'un quart des cas, ce qui lui aurait déjà suffi à prendre l'avantage. Qualifions un nombre observé de « record » s'il s'agit du nombre le plus grand rencontré jusqu'à présent. Supposons que vous retourniez la moitié des cartes ou bouts de papier (ou que vous interviewiez les 50 premiers candidats au mariage) sans vous arrêter, quelle que soit la valeur, même élevée, du nombre écrit. Vous vous arrêtez ensuite au premier record atteint. Si le deuxième nombre plus élevé des 100 cartes se trouve être dans les 50 premières que vous retournez, et que le plus élevé se trouve dans la seconde moitié (ce qui se produit une fois sur quatre), alors vous gagnez.

Gagner plus d'une fois sur trois

Cette stratégie est bonne, mais il en existe une meilleure encore (voir la figure 2). N'observez que 37 cartes (ou époux potentiels) sans vous arrêter, puis arrêtez-vous au record suivant. John Gilbert et Frederick Mosteller, de l'Université Harvard, ont prouvé que cette stratégie est la meilleure et garantit que l'on s'arrêtera sur le plus grand nombre dans environ 37 pour cent des cas. Plus précisément, on montre qu'en observant $N/e \approx 37$ cartes, N étant le nombre total de cartes et e étant la base des logarithmes naturels ($e = 2,71828...$), on est sûr de gagner avec une probabilité supérieure à $1/e > 0,36$, quel que soit le nombre de cartes.

Parfois, le but est de s'arrêter sur l'un des k meilleurs nombres ou candidats parmi N . Autrement dit, vous gagnez si vous vous arrêtez sur l'un des k nombres les plus élevés. Aux jeux Olympiques ou aux courses, l'objectif correspond souvent au cas $k = 1$ (gagner une médaille ou être placé) plutôt que le tout ou rien du cas $k = 1$ (gagner la médaille d'or ou arriver en tête) qui est beaucoup plus risqué.

La stratégie optimale pour s'arrêter sur l'un des k meilleurs est semblable à celle pour s'arrêter sur le meilleur. Tout d'abord, il vous faut observer un nombre fixé de candidats sans vous arrêter, afin de constituer une base de référence. Puis, pour une autre série fixée de tentatives, arrêtez-vous si vous tombez sur un record. Comme ce sera provisoirement le meilleur, il est assez vraisemblable qu'il s'agira d'un des k meilleurs.

Si aucun record n'apparaît pendant cette durée, alors passez à l'étape suivante où vous vous arrêtez sur l'un des deux nombres les plus élevés pour une certaine durée fixe, et ainsi de suite. Pour $k = 2$, cette méthode garantit à plus de 57 pour cent de s'arrêter sur l'un des deux meilleurs, même s'il y a un million de cartes. Pour N petit, la probabilité est assez élevée. Ainsi, pour $N = 7$ et $k = 2$, la stratégie garantit que l'on gagne dans les deux tiers des cas (voir la figure 3).

Maintenant, supposons que vous ayez à décider quand s'arrêter dans un choix entre seulement deux cartes ($N = 2$) : vous en retournez une et vous devez juger si le nombre inscrit est supérieur au nombre caché sous l'autre carte. L'étonnant résultat, avancé à l'origine par David Blackwell, de l'Université de Californie à Berkeley, est que l'on peut gagner à ce jeu plus d'une fois sur deux (voir la figure 4).

À l'évidence, on peut gagner exactement une fois sur deux en s'arrêtant systématiquement sur le premier nombre, ou systématiquement sur le second, sans même les regarder. Mais pour gagner dans plus de la moitié des cas, on doit trouver un moyen d'utiliser l'information liée au premier nombre pour décider s'il convient de s'arrêter ou pas.

Une règle d'arrêt qui le permet est la suivante. Tout d'abord, générez un nombre aléatoire R selon une loi gaussienne (loi de distribution statistique classique, dont la courbe représentative – en abscisse les nombres, en ordonnée leurs fréquences de tirage – a une forme de cloche) à l'aide d'un ordinateur ou d'un autre dispositif. Retournez alors l'une des cartes et lisez le nombre écrit dessus. Si R est supérieur au nombre observé, continuez et retournez la seconde carte. Si R est inférieur, restez-en au nombre indiqué sur la première carte.

Comment une stratégie aussi simple garantit-elle de gagner dans plus de la moitié des cas ? Notons N_1 et N_2 les deux nombres inscrits, avec $N_1 < N_2$. Soit p la probabilité (inconnue a priori) de choisir, selon la loi gaussienne, un nombre R inférieur à N_1 et q la probabilité de choisir un R supérieur à N_2 (voir la figure 4).

Supposons R inférieur à N_1 ; dans cette hypothèse vraie avec la probabilité p , vous gagnez une fois sur deux, donc avec une probabilité $p/2$. Si R est supérieur à N_2 , situation de probabilité q , vous gagnez encore une fois sur deux, donc avec la probabilité $q/2$. Mais si R tombe entre les deux

nombre inscrits ($N_1 < R < N_2$), situation qui se produit avec une probabilité strictement positive égale à $1 - p - q$ (la distribution gaussienne attribue une probabilité positive à tout intervalle), alors vous gagnez à chaque fois, c'est-à-dire avec la probabilité $1 - p - q$.

Au total, en prenant en compte les trois situations possibles pour le nombre R choisi, vous gagnez avec la probabilité $p/2 + q/2 + 1 - p - q$. Or cette probabilité, qui s'écrit aussi $1/2 + (1 - p - q)/2$, est supérieure à $1/2$, puisque $1 - p - q$ est positif. Par exemple, si les deux nombres cachés sont 1 et 100, la loi gaussienne donne p égal à environ 0,8413 et q égal à environ 0,0008; il s'ensuit qu'avec la stratégie indiquée, la probabilité de sélectionner le plus grand des deux nombres est supérieure à 57 pour cent.

Bien sûr, si la personne qui écrit les nombres sait que vous utilisez la stratégie gaussienne, elle peut, en choisissant des nombres N_1 et N_2 très proches, ramener votre probabilité de gagner au plus près de $1/2$. Si ce n'est pas complètement libre de choisir n'importe quels nombres, mais est obligé, par exemple de prendre des entiers compris entre 1 et 100, alors il lui sera impossible de rendre votre probabilité de gagner arbitrairement proche de $1/2$.

Récurrence à rebours

Au lieu de ne disposer, comme précédemment, d'aucune information préalable sur les valeurs impliquées, on peut avoir une information complète sur les probabilités et les valeurs exactes de toutes les observations potentielles futures. Considérons un jeu consistant à lancer au maximum cinq fois un dé à six faces. Vous pouvez vous arrêter quand vous voulez et recevoir alors comme récompense autant de Krugerrands (pièces d'or sud-africaines dont la valeur actuelle avoisine 750 euros) que de points affichés par le dé au moment où vous vous arrêtez.

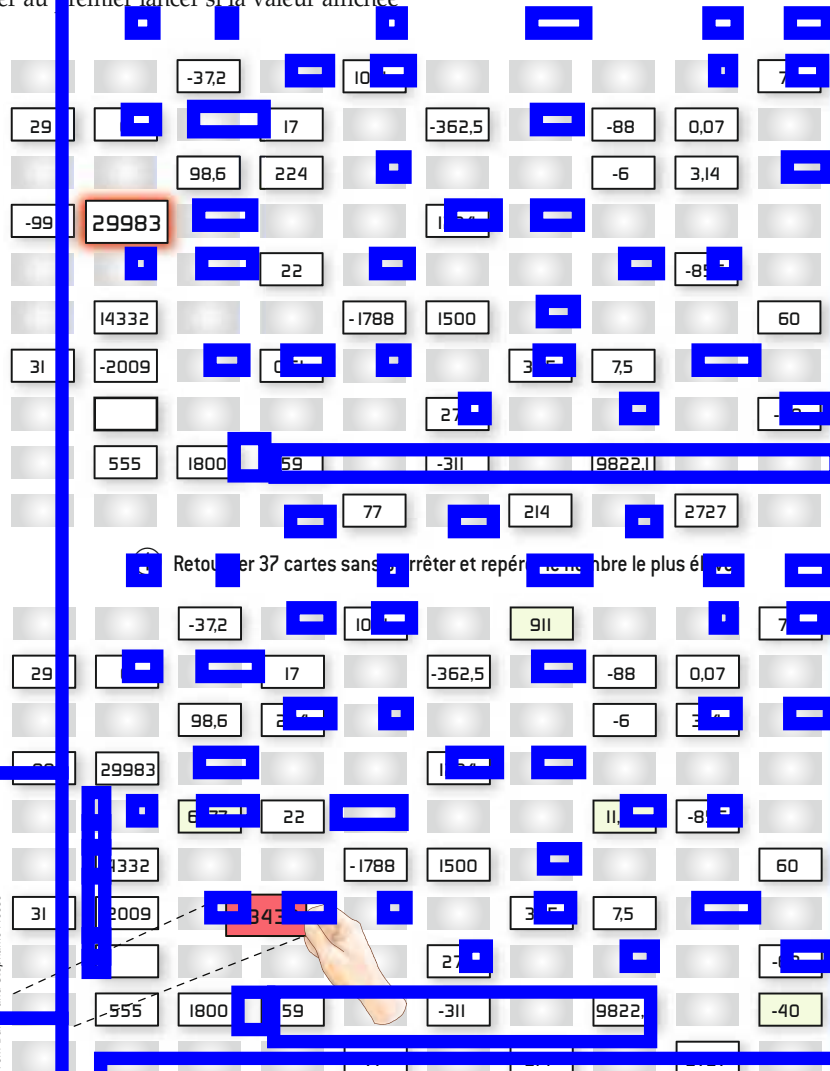
Contrairement aux problèmes de mariages sans information, ici tout est connu. Les résultats possibles de chaque lancer sont 1, 2, 3, 4, 5 et 6, et la probabilité de chacun à chaque lancer est d'un sixième. Il s'agit de trouver la règle d'arrêt qui maximise le nombre de Krugerrands que l'on peut espérer gagner en moyenne.

Si vous vous arrêtez toujours au premier lancer, par exemple, le gain sera simplement l'espérance mathématique d'une variable aléatoire qui prend les valeurs 1,

2, 3, 4, 5 ou 6 avec une probabilité $1/6$ pour chacune. En d'autres termes, une fois sur six vous gagnerez un Krugerrand, une fois sur six vous en gagnerez deux, etc., ce qui donne l'espérance mathématique : $1(1/6) + 2(1/6) + 3(1/6) + 4(1/6) + 5(1/6) + 6(1/6) = 7/2$.

Ainsi, si vous vous arrêtez toujours au premier lancer, vous gagnerez 3,5 Krugerrands en moyenne. Bien sûr, il n'est pas optimal de s'arrêter au premier lancer s'il donne un 1, et il est toujours optimal de s'arrêter s'il donne un 6. Mais faut-il s'arrêter s'il donne un 5 au premier lancer ? Une méthode générale puissante pour résoudre ce type de problème est la « récurrence à rebours ».

Il est évidemment optimal de s'arrêter au premier lancer si la valeur affichée



② Continuer à retourner des cartes en s'arrêtant dès que l'on tombe sur un « record »

2. S'IL FAUT TROUVER le plus grand nombre parmi 100 écrits sur des cartes retournées, une bonne stratégie est de retourner d'abord 37 cartes, puis de continuer et de s'arrêter sur le premier nombre supérieur à ceux déjà vus. On démontre que l'on gagne ainsi dans 37 pour cent des cas.

L'AUTEUR



Theodore Hill est professeur émérite de mathématiques à l'Institut de technologie de Georgia aux États-Unis.

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

par le dé est supérieure à celle attendue dans le cas où vous continuez à lancer le dé après avoir rejeté le premier lancer. Cela vous placerait dans un nouveau jeu où vous n'avez droit qu'à quatre lancers, dont l'espérance mathématique est également inconnue au départ. La stratégie optimale dans un problème à quatre lancers, à son tour, est de s'arrêter au premier lancer si la valeur obtenue est supérieure au gain espéré en continuant avec un problème à trois lancers, et ainsi de suite. On aboutit au problème à un lancer, pour lequel il n'y a qu'une stratégie, à savoir s'arrêter et la récompense attendue est l'espérance mathématique d'un unique lancer de dé, dont nous avons vu qu'elle vaut 3,5 (voir la figure 6).

Cette information nous donne à son tour la stratégie optimale d'un problème à deux lancers : s'arrêter au premier lancer si la valeur est supérieure à ce que vous espérez gagner en continuant, c'est-à-dire supérieure à 3,5. Nous connaissons donc maintenant la stratégie optimale pour un

problème à deux lancers (s'arrêter au premier lancer si c'est un 4, un 5 ou un 6, continuer sinon) et cela permet de calculer la récompense espérée.

Dans un problème à deux lancers, on gagne 4, 5 ou 6 au premier lancer avec une probabilité de 1/6 chacun, et l'on s'arrête. Sinon, quand le premier lancer est un 1, un 2 ou un 3, situation qui se produit une fois sur deux, on continue, auquel cas on s'attend à gagner 3,5 en moyenne. Ainsi, la récompense attendue pour le problème à deux lancers est :

Stratégie optimale

Cela fournit maintenant la stratégie optimale pour un problème à trois lancers, à savoir s'arrêter si le premier lancer est un 5 ou un 6 (c'est-à-dire supérieur à 4,25) et sinon continuer et ne s'arrêter que si le second lancer est un 4, 5 ou 6, et dans le cas contraire poursuivre avec un troisième

lancer. La connaissance de cette récompense attendue pour trois lancers donne à son tour la stratégie optimale pour un problème à quatre lancers : ne s'arrêter au premier lancer que s'il donne un 5 ou un 6, s'arrêter au second lancer si c'est un 5 ou un 6, au troisième si c'est un 5 ou un 6, au quatrième si c'est un 4, un 5 ou un 6, et sinon aller jusqu'au lancer final. Cette stratégie garantit que vous gagnerez 5,1 en moyenne, et aucune stratégie n'est meilleure.

La méthode de la récurrence à rebours est polyvalente, et fonctionne aussi bien lorsque les valeurs du processus ne sont pas indépendantes (comme elles sont supposées l'être lorsqu'on lance plusieurs fois le dé), que si l'on s'agit de minimiser une espérance mathématique telle que le coût.

Supposons qu'une entreprise doive acheter son approvisionnement hebdomadaire d'énergie le lundi, mardi ou mercredi précédent et que la probabilité des prix à venir puisse être estimée sur la base de statistiques passées. Par exemple, si le lundi l'acheteur a l'occasion de payer l'énergie pour la semaine suivante à un prix de 100, il peut savoir d'expérience qu'il y a une probabilité 1/2 pour que le prix du mardi soit 110, et 90 sinon. De plus, il sait que si le prix est égal à 110 le mardi, alors le prix sera de 115 le mercredi avec une probabilité égale à 1/3, et de 100 autrement ; et que s'il vaut 90 le mardi, il a autant de chances de valoir 100 que 85 le mercredi.

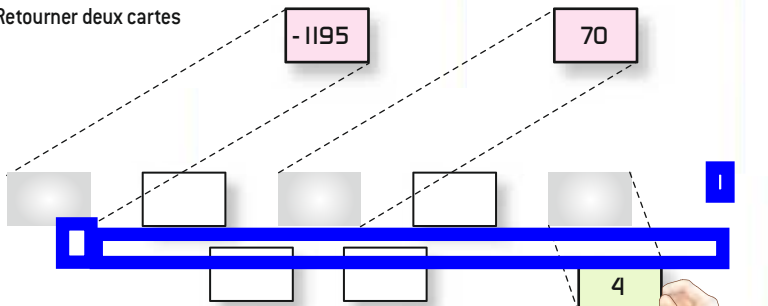
Par récurrence à rebours, on voit que la règle optimale pour le mardi est de ne pas acheter si le prix est de 110, puisque 110 est supérieur à l'espérance mathématique du prix s'il attend mercredi pour acheter, espérance égale à :

$$(1/3)(115) + (2/3)(100) = 105.$$

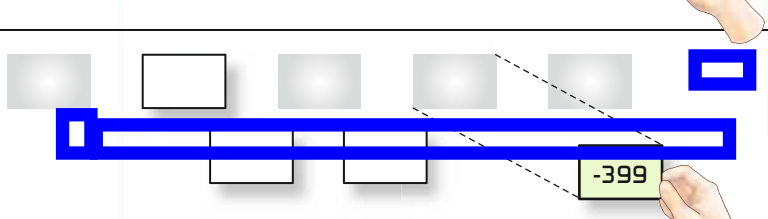
De la même façon, si le prix mardi est de 90, il est optimal d'acheter. En remontant jusqu'au lundi, puisque 100 est supérieur à l'espérance de prix s'il continue (à savoir $(1/2)(105) + (1/2)(90) = 97,5$), il est optimal de ne pas acheter le lundi. Ces éléments réunis constituent la stratégie optimale d'arrêt.

Dans le cas où l'information est complètement aveugle pour objectif de s'arrêter sur l'une des plus grandes valeurs, on ignoreait qu'il y avait les meilleures probabilités possibles de gagner pour des séquences finies générales de variables aléatoires indépendantes. En utilisant à la fois la récurrence normale et celle à rebours, et une classe de théorèmes

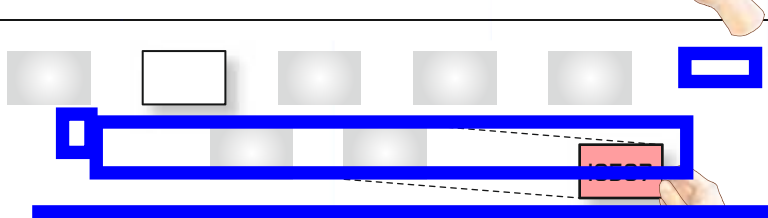
① Retourner deux cartes



② Retourner une troisième carte et s'arrêter seulement si c'est un « record »



③ Retourner une quatrième carte et s'arrêter seulement si c'est un « record »



④ Continuer de retourner les cartes et s'arrêter seulement si on tombe sur l'un des deux plus grands nombres obtenus jusque-là

3. S'IL S'AGIT DE S'ARRÊTER dès l'obtention d'une des k meilleures valeurs, on peut là aussi augmenter ses chances de succès. Si on désire obtenir un des deux meilleurs choix sur sept, on peut gagner deux fois sur trois avec la stratégie indiquée.

statistiques nommées pyramides de Bernoulli, Douglas Kennedy, de l'Université de Cambridge, et moi avons découvert ces probabilités optimales. Nous avons prouvé vers 1992 que pour toute séquence finie de variables aléatoires indépendantes, il y a toujours une règle d'arrêt qui tombe sur la valeur la plus élevée avec une probabilité au moins égale à $1/e$, et une règle d'arrêt qui tombe sur l'une des deux valeurs les plus élevées avec une probabilité au moins égale à $(1 + \sqrt{2})\exp(-\sqrt{2})$, soit environ 0,59 – c'est le mieux que l'on puisse faire. Les probabilités de s'arrêter sur l'une des k valeurs les plus élevées ont des formules similaires.

Notons que les ordinateurs n'ont été d'aucune aide pour résoudre ce problème. En fait, tous les problèmes décrits dans cet article ont été résolus en utilisant des outils mathématiques classiques, en travaillant exemple après exemple avec du papier et un crayon; en résolvant le cas avec deux, trois, puis quatre inconnues; en cherchant des régularités; en attendant que viennent des idées lumineuses; enfin, en cherchant à démontrer formellement chaque étape.

Quand l'information n'est que partielle

Le cas où l'information n'est que partielle est le plus difficile. D'ordinaire, on ne sait pas d'avance combien de candidats il y aura à un emploi donné, ni les probabilités des valeurs futures des actions en Bourse. Dans ces situations, une méthode de résolution consiste à utiliser les outils de la théorie des jeux. Le problème de l'arrêt peut y être envisagé comme celui d'un décideur jouant contre un adversaire qui peut fixer les valeurs et les probabilités à sa guise.

Ulrich Krenzel, de l'Université de Göttingen, et moi-même avons utilisé cette technique pour découvrir la stratégie optimale dans le problème dit du mariage, où seule une borne supérieure au nombre de candidats est connue.

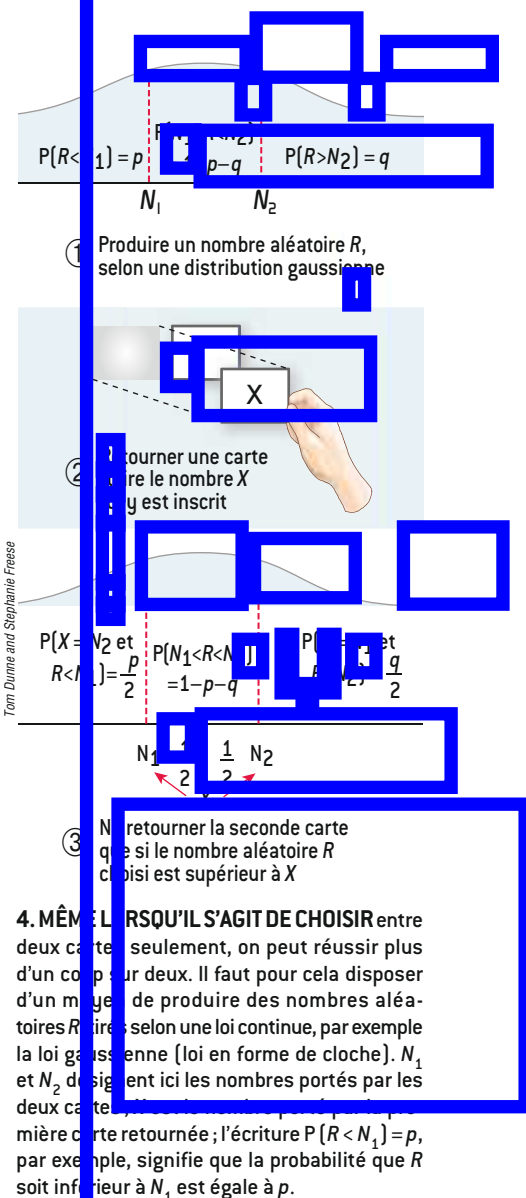
À titre d'exemple concret, considérons le problème consistant à sélectionner le plus grand nombre dans un chapeau contenant au moins une, et au plus cinq, cartes numérotées (si vous ne vous arrêtez pas et qu'il ne reste aucune carte, vous avez perdu). Nous avons démontré que la stratégie optimale dans ce cas est de s'arrêter à la première carte avec la probabilité 26/75. Si vous ne vous arrêtez pas à la première carte, alors vous continuez jusqu'à la

deuxième carte, s'il y en a une. Si le nombre de la deuxième carte est supérieur à celui de la première, arrêtez-vous avec la probabilité 26/49. Sinon, continuez, en vous arrêtant au premier record (ou lorsque vous avez épuisé vos cartes ou que vous êtes forcé de choisir le nombre de la cinquième carte). Cela garantit une probabilité de 26/75 de s'arrêter sur le nombre le plus élevé, quel que soit le nombre (entre un et cinq) de cartes déposées dans le chapeau.

Il n'existe pas de meilleure stratégie. Nous vous avons trouvé les formules exactes pour toutes les limites possibles sur le nombre maximum de cartes, et les probabilités de gagner sont étonnamment élevées. Par exemple, si vous savez seulement qu'il y a entre 1 et 100 cartes dans le chapeau, il est encore possible de gagner environ une fois sur cinq. On peut utiliser exactement la même méthode pour obtenir les règles d'arrêt optimal dans de nombreux problèmes de la vie courante, par exemple quand un employeur veut embaucher le meilleur vendeur sur le marché, connaît le nombre maximum de candidats au poste, mais ignore combien d'entre eux ont déjà accepté une autre offre.

Dans un autre type de problème d'arrêt impliquant une information partielle, l'observateur connaît exactement la longueur de la séquence (par exemple le nombre de cartes), mais il ne dispose que d'une information partielle sur les valeurs (aléatoires) écrites sur les cartes. Au lieu de n'avoir aucune information du tout, on ne connaît que toutes les valeurs et probabilités possibles, il pourrait ne connaître que la valeur moyenne et l'écart type de chaque variable aléatoire. Dans le cas où les variables sont indépendantes, Frans de Waard, de l'Université libre d'Amsterdam, et moi-même avons réussi à déterminer les règles d'arrêt optimal, mais les techniques que nous avons utilisées, issues notamment de la théorie des jeux, échouent dans la plupart des autres problèmes d'arrêt à information partielle.

Bien que de nombreux problèmes d'arrêt aient été résolus, il subsiste des problèmes très simples qui, de manière très frustrante, restent non résolus, même parmi ceux qui font intervenir une information complète. Mon préféré est le suivant. Vous tirez à pile ou face avec une pièce non truquée, en vous arrêtant quand vous voulez. La récompense est le nombre moyen de faces obtenues (nombre de faces divisé par le nombre



Tom Dume and Stephanie Freese

RÉSULTATS DES TIRAGES À PILE OU FACE

	GAIN SI L'ON S'ARRÊTE	STRATÉGIE OPTIMALE
	1,00	S'arrêter
	0,00	Continuer
	0,50	Continuer
	0,33	Continuer
	0,67	S'arrêter
	0,63	?

5. QUAND CONVIENT-IL S'ARRÊTER ? Une séquence de tirages à pile ou face pour maximiser le nombre moyen de faces obtenues ? Certain qu'il ne faut pas s'arrêter si on a pas une majorité absolue de faces. Mais la question est de savoir quand faut-il viser ? On ne le sait pas exactement. Il est évident.

de lancer au moment où vous vous arrêtez (voir la figure 5).

Si votre premier lancer est une face et que vous vous arrêtez, votre récompense est ainsi de 100 pour cent de faces. Puisque vous ne pouvez jamais avoir plus de 100 pour cent de faces, il est optimal de s'arrêter dans ce cas. Si, en revanche, le premier lancer tombe sur le côté pile, il est préférable de ne pas s'arrêter tout de suite, puisque votre récompense serait nulle. Supposons que le premier tirage soit pile, et le second face. Vous pouvez vous arrêter là et recevoir un demi-Krugerrand, ou bien continuer à tirer. Un peu de réflexion montre qu'il n'est jamais optimal de s'arrêter avec un demi-Krugerrand ou moins. En effet, en vertu de la loi des grands nombres, plus le nombre de lancers est grand, plus la proportion de faces s'approche de 50 pour cent, en oscillant aléatoirement au-dessus et au-dessous de cette valeur. S'arrêter à 50 pour cent n'est tout simplement pas assez ambitieux.

Avec un peu plus de difficulté, on montre que s'arrêter au troisième tirage après pile-face-face est optimal, et que s'arrêter la première fois qu'on observe plus de faces que de piles est optimal pendant un certain temps. Mais s'arrêter la première fois que vous avez davantage de faces que de piles ne reste pas éternellement optimal. Au bout d'un certain temps, on devrait s'arrêter seulement si l'on a deux faces de plus que de piles, puis après un deuxième temps critique, s'arrêter seulement si l'on a trois faces d'avance, et ainsi de suite.

Nombre maximal de lancers du dé	Arrêter si le premier lancer donne	Gain moyen
1	1, 2, 3, 4, 5 ou 6	3,5
2	4, 5 ou 6	4,25
3	5 ou 6	4,67
4	5 ou 6	4,94
5	5 ou 6	5,13

6. ON CONSIDÈRE LE JEU consistant à lancer N fois ($N < \infty$) au plus un dé à six faces, en s'arrêtant quand on veut. On gagne un nombre de pièces égal à ce qu'indique le dernier lancer. Pour N fixé, la stratégie optimale consiste à s'arrêter au premier lancer si l'on donne l'un des résultats indiqués, et sinon d'effectuer un nouveau lancer et d'appliquer la stratégie correspondant à $N - 1$ lancers (récurrence à rebours).

La démonstration de ce fait n'est pas aisée, et la liste complète des temps critiques n'est pas connue. La récurrence à rebours ne fonctionne pas pour ce problème puisqu'il n'y a *a priori* pas de fin à la séquence et donc pas de temps futur à partir duquel on puisse raisonner à reculons. Malgré des avancées très récentes de Wolfgang Stadler de l'Université d'Osnaabrück en Allemagne, la règle optimale exacte pour toutes les séquences de faces et de piles est inconnue.

Néanmoins, le domaine général de l'arrêt optimal, en particulier avec ses applications aux marchés financiers, continue à se développer à vive allure. En fait, certains spécialistes trouvent que ce rythme a été trop rapide et que les modèles informatiques de évaluation des options financières et des produits dérivés sont à l'origine de l'actuelle crise économique. Mais ce n'est pas la théorie qui est en cause. Comme d'autres, j'en attribue la responsabilité à la confiance aveugle des décideurs dans les prédictions des modèles informatiques. En fait, de nouvelles idées et découvertes en matière d'arrêt optimal, y compris de meilleures estimations du risque que les modèles mathématiques soient erronés, sont exactement ce dont nous avons besoin – non seulement comme guide pour savoir quand mettre fin aux interventions, par exemple, mais aussi pour faire face à de nombreux autres problèmes cruciaux, notamment quand arrêter d'utiliser des combustibles fossiles ou de stocker des armes nucléaires.

Dans tout bon document
il y a un début, un milieu,
et...

EndNote[®] X2



Les nouveautés d'EndNote X2

- Grâce à **EndNote X2** vous pouvez, à partir des références, directement importer le texte intégral, si celui-ci est disponible, en utilisant la commande «**Find Full Text**».
- Les «**Smart Groups**» vous permettront de mieux trier automatiquement vos références par thématique. C'est un bon complément des «**Custom Groups**» et vous pourrez en créer jusqu'à 500.
- Deux nouveaux champs renseignés automatiquement (*date de saisie* et *date de dernière modification*) vont vous permettre de faciliter la gestion de votre base.
- L'accès aux connexions les plus utilisées est grandement facilité grâce à une interface utilisateur repensée.
- La base de données dans laquelle la recherche de références s'effectue est maintenant clairement indiquée, vous permettant ainsi de mieux superviser la construction de votre bibliographie.

Vous avez accès à toujours plus de styles (+ de 3300), de connections (2800) et de filtres (+ de 630).

Encore plus d'informations sur EndNote X2

➔ www.ritme.com/go/endnote

➔ www.scientific-solutions.ch/go/endnote

ENDNOTE X2 EST DISPONIBLE POUR WINDOWS (XP/VISTA) ET MAC OS X



DE LA DECOUVERTE A LA PUBLICATION...

... PASSEZ A LA VITESSE SUPERIEURE

ENDNOTE X2



Ritme Informatique
34, Bd Haussmann 75009 Paris
Tél. : 01 42 46 00 42
Fax : 01 42 46 00 33
www.ritme.com — info@ritme.com

SCIENTIFIC solutions

Scientific Solutions SA
Rue du Midi 2 — CH-1009 Pully-Lausanne
Tél. : 021 711 15 20 — Fax : 021 711 15 21
www.scientific-solutions.ch — info@scientific-solutions.ch

Menaces sur le



thon rouge

Alain Fonteneau et Jean-Marc Fromentin

Surtout pêché pour les marchés japonais du sushi, le plus grand des thons est victime de son succès et est fortement surexploité.

L'ESSENTIEL

- ✓ Le thon rouge est l'un des poissons les plus chers au monde, car c'est une chair de premier choix pour les sushis.
- ✓ Il vit plus de 20 ans, se reproduit surtout en Méditerranée et se déplace dans tout l'océan Atlantique Nord.
- ✓ Il est surtout pêché au moment de la reproduction, là où les thons se rassemblent : le nombre de reproducteurs chute et le renouvellement des générations risque de ne plus être assuré.
- ✓ Les solutions pour diminuer la capacité de pêche et contrôler le marché japonais du sushi.

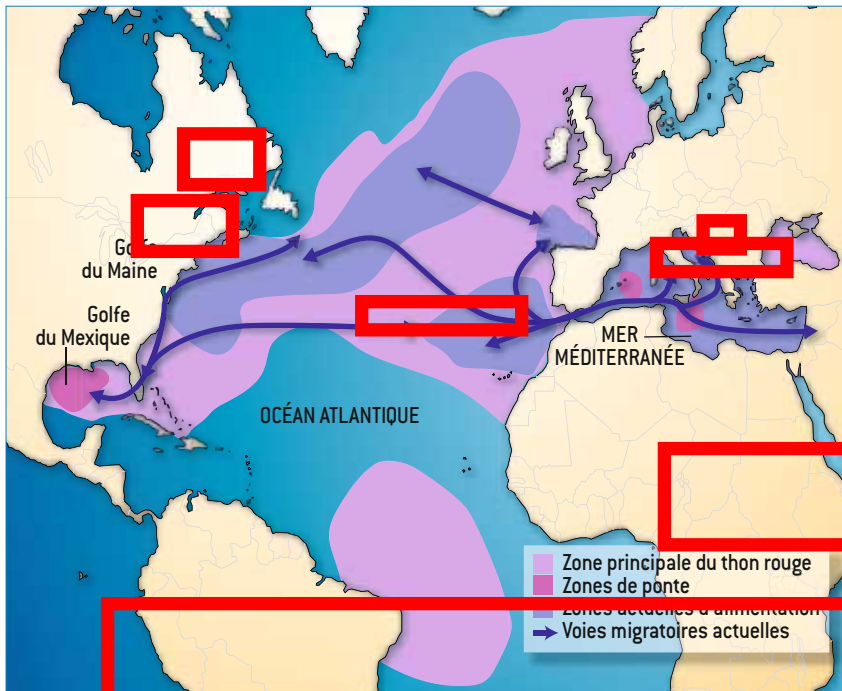
En 2011, un thon rouge de 141 kg, l'atlantique (*Thunnus thynnus*) de 300 kilogrammes s'est vendu 174 000 dollars sur un marché aux poissons à Tokyo. Et le chef japonais du restaurant le plus cher de New York, le Masa, le temple du sushi au thon rouge, propose des menus à partir de 300 euros ! Le thon rouge est l'un des poissons les plus convoités au monde : il représente le tout premier choix pour les sushis – du poisson cru accompagné de riz – et les sashimis – du poisson cru seul. C'est aussi un géant parmi les poissons : ses caractéristiques biologiques sont exceptionnelles et complexes. Après deux millénaires d'exploitation durable, c'est aujourd'hui l'une des espèces de poissons les plus menacées au monde.

Tous les thons ne se ressemblent pas ; le thon en conserve est soit du thon blanc (*Thunnus alalunga*), soit du thon jaune ou albacore (*Thunnus albacares*), soit du thon listao (*Katsuwonus pelamis*). Les deux premières espèces, qui mesurent au plus un mètre et demi de long alors que la troi-

sième fait moins de un mètre, sont pêchées en grande quantité (plus de quatre millions de tonnes par an) dans le monde. Le thon obèse (*Thunnus obesus*) est une espèce de plus grande taille aussi appréciée crue par les Japonais, et il existe un thon rouge du Pacifique (*Thunnus orientalis*), proche du thon rouge de l'Atlantique, mais plus petit... C'est bien le thon rouge de l'Atlantique – le maguro au Japon – qui est actuellement le plus recherché. Les menaces d'effondrement qui pèsent sur cette ressource sont réelles.

Un géant très mobile

Quels sont les risques que le thon rouge de l'Atlantique rejoigne sous peu la morue du Canada dans la liste des stocks de poissons épuisés par la pêche ? Nous tenterons de répondre à cette question en analysant les conclusions des scientifiques et les mesures de gestion décidées et mises en œuvre par la Commission internationale pour la conservation du thon de l'Atlantique, la CICTA, l'organisme



1. LES THONS ROUGES SONT DE GRANDS MIGRATEURS. Ils migrent des zones de ponte, les eaux chaudes de Méditerranée et du golfe du Mexique, vers les régions où ils s'alimentent, telles que le golfe du Maine ou la Méditerranée. Ils peuvent parcourir 7 700 kilomètres en 50 jours, bien qu'ils se reproduisent surtout en Méditerranée, entre mai et juin. Ils reviennent toujours pondre là où ils sont nés.

La CICTA

✓ Depuis 1967, la conservation des thons de l'Atlantique a été confiée à la Commission internationale pour la conservation des thonidés de l'Atlantique, la CICTA. C'est un organisme international créé sous l'égide des Nations unies et de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (la FAO). La CICTA comprend un secrétariat qui centralise les données de pêche, un comité scientifique qui suit l'état des ressources thonières de l'Atlantique, et une assemblée décisionnelle internationale qui, à partir des travaux scientifiques, construit les mesures de gestion. Ces dernières doivent, *in fine*, être mises en place par les différents pays pêcheurs.

international créé en 1967 et responsable de la conservation de cette ressource.

Le thon rouge de l'Atlantique est l'espèce de thon qui atteint les plus grandes tailles : les thons géants de plus de 500 kilogrammes sont rares, mais le thon rouge peut atteindre plus de 750 kilogrammes et quatre mètres de long. Ces thons sont très recherchés par de nombreux pêcheurs professionnels et sportifs. Le thon rouge peut vivre plus de 20 ans ; sa croissance est rapide, puisqu'en Méditerranée, il atteint 30 kilogrammes à l'âge de quatre ans, et les femelles de cette taille commencent déjà à se reproduire. En revanche, dans l'Atlantique Ouest, la ponte du thon rouge serait plus tardive, quand les femelles auraient huit ans, pesant alors près de 100 kilogrammes.

Tous les thons sont de grands migrants. Le thon rouge en est un parfait exemple, car il effectue en permanence de grands déplacements : les migrations vers les zones de ponte – les eaux chaudes, supérieures à 22 °C, de Méditerranée et du golfe du Mexique – ou les migrations vers les zones d'alimentation dans les régions « froides » (souvent dans des eaux froides), telles que le golfe de Gascogne, la mer du Nord, la Méditerranée occidentale et centrale, le golfe du Maine et du Saint-Laurent, le Gulf Stream et par-

fois les zones équatoriales (comme au large du Brésil, voir la figure 1).

Les scientifiques ont mis en évidence les déplacements du thon rouge grâce aux nombreux marquages réalisés sur cette espèce depuis plus d'un demi-siècle. Depuis une décennie, des marques électroniques – de type minibalises ARGOS – sont utilisées pour reconstituer avec plus de précision les routes migratoires. Le thon rouge se déplace rapidement : il peut parcourir 7 700 kilomètres en 50 jours, soit une vitesse moyenne de 6,4 kilomètres par heure et des pointes à 20-30 kilomètres par heure. En outre, le thon rouge, mais aussi d'autres thons, effectuent de fréquentes plongées jusqu'à un kilomètre de profondeur (mais on en ignore encore les raisons). Toutefois, certains groupes de thons rouges seraient moins mobiles, notamment en Méditerranée. Pourquoi certaines populations ne migrent-elles pas ? Ces « fractions résidentes » sont-elles importantes ? Traduisent-elles une division complexe de la population en diffé-

rentes sous-populations, chacune ayant des caractéristiques migratoires différentes (voir l'encadré page 38) ?

Quoi qu'il en soit, il est important de bien connaître les déplacements du thon rouge, car ils conditionnent l'estimation des stocks que les scientifiques choisissent pour évaluer les ressources, puis pour les gérer.

Un thon fidèle à sa région natale

Le thon rouge de l'Atlantique ne se reproduit qu'en Méditerranée – autour de la Sicile et de Malte, entre Chypre et la Turquie, autour des Baléares – et au Nord du golfe du Mexique, et ce, toujours en mai et juin. La ponte est proportionnelle au poids des femelles : si ces dernières sont âgées, elles sont capables de pondre chaque année des dizaines de millions d'œufs (mais les larves n'ont qu'une chance infime d'atteindre l'âge adulte).

En raison de cet important potentiel de ponte, on pourrait penser que le thon rouge résiste à la surexploitation ; mais les effondrements de plusieurs stocks de morue de l'Atlantique – une autre espèce très féconde – ont montré que cette capacité ne suffit pas...

On dispose de nombreux marquages électroniques réalisés depuis dix ans et les connaissances biologiques, chimiques et halieutiques sur le thon rouge augmentent.

que ce dernier revient probablement pondre là où il est né, à l'instar des saumons, des tortues ou des anguilles. Ce phénomène dit de *homing* en français, « retour au bercail ») est logique d'un point de vue évolutif : toute espèce ayant une vaste distribution spatiale doit pouvoir se retrouver et se regrouper dans une zone précise à un moment donné pour se reproduire avec succès.

Les thons rouges mangent tout ce qu'ils peuvent attraper, et ils attrapent presque tout ce qui nage, flotte ou rampe sur les fonds marins ; leur alimentation est très variée et même opportuniste. S'ils dévorent de grandes quantités de jeunes harengs, anchois et sardines qui vivent en bancs côtiers sur les plateaux continentaux (mer du Nord, Bretagne, golfe de Gascogne), ils consomment aussi les poissons et les crustacés présents sur le fond de l'Océan, par exemple des lançons (des petits poissons souvent enfouis dans le sable), des hippocampes et même des homards. Ils mangent parfois des méduses, sans oublier les proies classiques des thons en haute mer, telles que les céphalopodes, les crustacés et les poissons pélagiques hauturiers.

Cette variété est classique pour les thons, mais elle est extrême pour le thon rouge. Elle est d'autant plus marquée que ce poisson est le seul capable de vivre dans une large gamme d'écosystèmes chauds ou froids, avec des températures comprises entre 2 et 30 °C. En effet, le thon rouge est doté d'une excellente thermorégulation (la plus efficace parmi les thons) ; les adultes conservent ainsi durant des mois une température interne de 20 °C, même quand ils nagent dans des eaux froides (à 5 °C par exemple). Rappelons que, chez la plupart des autres poissons (à l'exception des requins), la température interne varie avec celle de l'environnement.

Une ressource exploitée depuis l'Antiquité

Le thon rouge de l'Atlantique n'a pas toujours été considéré comme un mets délicat. Néanmoins, il est exploité de longue date. On sait qu'il était déjà pêché en Méditerranée 1000 ans avant notre ère, par exemple à Volos et Saliagos, ainsi qu'en mer du Nord et dans la Baltique, où les archéologues ont récemment retrouvé des vertèbres de thons, des hameçons et des pièges à poissons. Les civilisations phéni-

ciennes et romaines nous ont aussi légué de nombreux textes et images qui décrivent la pêche et les migrations du thon rouge, une pêche et un commerce profondément enracinés durant des siècles dans le bassin méditerranéen.

Les premiers dispositifs de grande envergure pour la capture du thon rouge ont été des filets encerclants, utilisés pendant des siècles en Méditerranée. Ainsi, cette sorte de plage permet de capturer les poissons à la surface, en pleine eau, en les encerclant avec un filet (voir la figure 2). La technique du piège fixe utilisant des filets ancrés, la « madrague » (voir la figure 3), apparaît en Sicile dès le XVI^e siècle, puis en Sardaigne mais seulement au début du XIX^e siècle en Andalousie. Les thons rouges ainsi capturés faisaient déjà l'objet d'un vaste marché international et étaient commercialisés dans toute l'Europe, salés, séchés, fumés ou conservés dans l'huile.

À côté de la pêche au thon rouge a été, avec celle du hareng et de la morue, l'une des toutes premières grandes pêcheries d'envergure internationale, impliquant des investissements bancaires importants.

On installait de nombreuses madragues en Méditerranée et sur les côtes du Maroc et de la péninsule Ibérique, près de Gibraltar. L'objectif était de capturer les thons rouges affectant leurs migrations annuelles de ponte de l'Atlantique Nord vers la Méditerranée. Des chercheurs

L'aquaculture au secours du thon rouge ?

En 2008, Richard Ellis, chercheur américain spécialiste d'histoire naturelle, développe une idée que la vu le jour dès la fin des années 1990 : peut-on élever le thon rouge ? Le Japon et l'Union européenne ont mis au point depuis plusieurs années des recherches ambitieuses sur l'aquaculture du thon rouge.

L'objectif de cette aquaculture est double : produire de grandes quantités de thon rouge pour le marché japonais du sashimi, et repeupler en larves ou en juvéniles de thons rouges des océans dépeuplés par la surexploitation. Ces travaux ont été très intéressants, au moins sur le plan scientifique, mais il semble que la production en

masse de thon rouge ne soit

En effet, il a fallu 25 ans au Japon pour obtenir des œufs de thons rouges éclos en captivité. Cet exemple montre combien l'élevage est complexe. De plus, il est coûteux à mettre en œuvre, car les thons rouges ont besoin de plus de 500 grammes de nourriture pour produire un seul kilogramme de thon.

En outre, il sera toujours difficile de produire en élevage des individus d'une qualité comparable aux thons sauvages capturés en haute mer. Cette différence est due au fait que les thons rouges, en particulier, ont été sélectionnés génétiquement par l'évolution comme des

espèces de haute mer et d'éco-

permanents sur des milliers de kilomètres et mangeant une nourriture très variée.

L'idée de repeupler l'océan Atlantique à partir de larves ou de juvéniles produits en captivité semble aussi hypothétique, tant à cause des difficultés de préserver la diversité génétique de la population, qu'à cause de la difficulté de produire des millions de juvéniles capables de survivre en haute mer ; rappelons que les succès de repeuplement à partir de l'aquaculture ont été sur-

peu mobiles, notamment les mollusques, mais rarement sur des espèces de poissons.

BIBLIOGRAPHIE

J.-M. Fromentin, *Lessons from the past : investigating historical data from bluefin tuna fisheries*, *Fish and Fisheries*, vol. 10, pp. 197-218, juin 2009.

J. R. Rooken et al., *Neon homing and connectivity in atlantic bluefin tuna populations*, *Science*, vol. 322, pp. 242-244, 2008.

Le thon rouge : une espèce surexploitée, *Dossier de presse Ifremer*, 2008.

J.-M. Fromentin et J.E. Powers, *Atlantic bluefin tuna : population dynamics, ecology, fisheries and management*, *Fish and Fisheries*, vol. 6, pp. 281-306, 2005.

B. A. Block et al., *Electronic tagging and population structure of atlantic bluefin tuna*, *Nature*, vol. 434, pp. 1121-1127, 2005.

français ont analysé les captures annuelles de ces madragues sur plusieurs siècles (de 1600 à 1950) : les captures atteignaient 30 000 tonnes en périodes favorables (15 000 tonnes en moyenne). Cependant, ces captures présentent de grandes fluctuations périodiques, qui s'étendent sur une centaine d'années et qui semblent liées aux changements de l'environnement, notamment de la température de l'eau, ce qui modifierait les routes migratoires du thon rouge.

Ces cycles à long terme, mis en évidence sur les pêcheries historiques de Méditerranée et d'Atlantique, conditionnent l'exploitation actuelle du thon rouge. Ainsi, si les captures peuvent être élevées dans les phases de forte biomasse du stock, elles doivent être réduites pendant les périodes de faible productivité. Dans ce contexte, la capture maximale n'est pas fixe, mais variable selon les conditions environnementales.



2. LA SENNE est un grand filet en cercle qui permet de capturer les poissons à la surface, en pleine eau. Ici, en Méditerranée, un senneur, le bateau équipé de ce filet.

Toujours plus de pêche

L'exploitation du thon rouge a fortement augmenté au cours du XX^e siècle avec le développement de plusieurs méthodes de pêche dans diverses régions de la Méditerranée et de l'Atlantique Nord. À partir des années 1940, apparaissent les flottilles de cannetiers (des navires pêchant avec des cannes et de l'appât vivant) et de ligneurs (des navires pêchant avec des lignes de traîne) dans le golfe de Gascogne et dans le détroit de Gibraltar, ainsi que des flottilles de senneurs encerclant des bancs de thons, d'abord en mer du Nord et en Norvège (dans les années 1935-1970), puis en Méditerranée (depuis 1950) et le long des côtes américaines (depuis 1960). Ensuite, en haute

mer, les flottilles de palangriers – surtout des navires japonais équipés de palangre, une très longue ligne de fil de pêche où sont fixés plusieurs milliers d'hameçons – ont exploité tout l'Atlantique à partir de la fin des années 1950. Et c'est sans compter sur les pêcheurs sportifs (considérant ce poisson imposant comme un digne adversaire), très actifs en mer du Nord, aux États-Unis, au Canada et en Méditerranée depuis le début du XX^e siècle, et la pêche récréative, liée au développement de la plaisance.

Quoi qu'il en soit, ces captures très diversifiées et de plus en plus importantes ont augmenté la pression halieutique, c'est-à-dire les quantités prélevées sur le stock de thon rouge, d'abord sur les individus de petite taille (les juvéniles), puis sur les gros reproducteurs. Les zones de pêche

au thon rouge exploitées par les palangriers depuis 50 ans sont variables. Par exemple, on s'interroge toujours sur les raisons qui ont conduit le thon rouge dans une zone équatoriale, autour du Brésil, dans les années 1960, où 30 000 tonnes ont été capturées en six ans.

Une partie de ces mystères dépendrait de la dynamique spatiale de cette espèce. Ainsi, la fin brutale des grandes pêcheries de thon rouge qui ont été très actives dans la mer du Nord jusqu'en 1962 (et qui exploitaient un mélange de thons provenant de Méditerranée et d'Atlantique Ouest) ne semble pas due à un effondrement local des stocks de thon rouge, mais plutôt à un changement de leurs routes migratoires en réaction au refroidissement de l'Atlantique Nord du début des années 1960 ; s'ajoute à cela

LES FERMES À THON ROUGES

La surcapacité des flottilles de pêche légales et illégales menace le thon rouge, notamment en Méditerranée où cette espèce se trouve piégée comme dans une nasse en mai et juin lors de sa reproduction. Depuis une dizaine d'années, se sont multipliées des fermes à thons rouges (voir ci-contre) ; ces derniers sont capturés par des senneurs en période de ponte, et donc en mauvais état physiologique, puis ils sont gardés en mer en bassins où ils sont nourris et engraisés pendant plusieurs mois. Ils sont ensuite vendus à un excellent prix sur le marché japonais du sashimi. Ces fermes ont augmenté la valeur marchande des thons rouges de Méditerranée, et favorisé l'accroissement et la modernisation des flottilles de senneurs, la cause majeure de la surexploitation actuelle du thon rouge. Le développement de ces fermes a également entraîné une augmentation des années de pêche enregistrées à la CICTA, car, comme des poissons vivants y sont retenus, ils ne sont pas comptabilisés. La mise en place d'observateurs dans les fermes permettrait de mieux utiliser ce comptage.





3. LA PÊCHE EST UN METIÈRE AU FOND DU PAYSAN, IL S'AGIT DE LA PHASE FINALE DE LA PÊCHE, AU MOMENT OÙ L'ON RELÈVE LE FILET DE FOND POUR RÉCUPÉRER LES POISSONS.

une surexploitation des populations de harengs dans la région, les jeunes harengs étant, en mer du Nord, la nourriture favorite des thons rouges.

En conséquence, les zones de pêche du thon rouge de l'Atlantique sont variables ; un tel phénomène a rarement été observé pour une autre espèce de thons, et, malgré de nombreuses recherches, le thon rouge demeure imprévisible. Cela complique quelque peu la gestion, mais il faut tout de même en tenir compte pour réglementer la pêche et préserver cette ressource.

Toutes les évaluations de ressources thonières, dont le thon rouge, reposent essentiellement sur les données de pêche, en particulier celles relatives aux quantités et aux tailles des thons capturés, selon les zones et les saisons, et aux efforts de pêche déployés (savoir le nombre, la taille et la performance des bateaux de pêche). Contrairement à d'autres espèces de poissons (la morue, le hareng ou l'anchois), les suivis à bord de navires scientifiques sont inutilisables pour estimer les biomasses des ressources thonières de haute mer, car les thons sont trop mobiles et dispersés dans de vastes zones. Seuls les programmes de marquage permettent d'obtenir des informations scientifiques indépendantes de la pêche, mais ces dernières ne suffisent pas, et les évaluations thonières dépendent encore largement de la qualité des données de pêche.

Malheureusement, les données sur le thon rouge fournies à la Commission internationale pour la conservation des thonidés de l'Atlantique (CICTA) par les pays

pêcheurs sont de mauvaise qualité, surtout depuis une dizaine d'années, suite à la mise en place de quotas en 1996 et au développement des fermes d'engraisement (voir l'encadré page ci-contre). À partir de données de marché et de capacité de pêche active (soit le nombre de navires en activité), les scientifiques estiment que les captures récentes de thon rouge en Méditerranée et en Atlantique Nord seraient très supérieures aux captures officiellement déclarées : environ 50 000 tonnes contre 10 000 à 32 000 tonnes déclarées.

Compte tenu de ces différents facteurs, peut-on estimer la pression halieutique réelle ? Pas si facile. On sait que les captures ont brutalement augmenté de 1992 à 1995 (voir la figure 4), pour deux raisons : d'une part, les pêcheurs européens, devenus plus efficaces, réalisèrent d'importantes prises, associées à des conditions environnementales favorables. D'autre part, comme on déclara en 1996 d'instaurer des quotas et que leur attribution fut décidée selon les prises historiques, certains pays ont révisé leurs statistiques pour augmenter les chiffres officiels... *In fine*, la hausse ne reflète pas totalement la réalité.

La deuxième composante nécessaire pour évaluer les stocks de thon rouge est une bonne connaissance de la biologie et des déplacements de l'espèce ; mais, comme nous l'avons évoqué, ces données restent insuffisantes. Dans ce contexte, le comité scientifique de la CICTA peut difficilement estimer de façon fiable et précise la biomasse de thon rouge. Cela étant,

ces limites ne remettent pas en question le diagnostic de surexploitation.

La communauté scientifique est en effet unanime : la capacité de pêche internationale actuelle – les données la concernant sont fiables – est largement excessive. De plus, aujourd'hui, elle s'exerce surtout lors de la reproduction des thons, quand ces derniers sont le plus vulnérables à la pêche, car concentrés dans quelques régions de Méditerranée. En outre, des indicateurs de certaines pêcheries bien suivies par les scientifiques confirment la tendance à la baisse du nombre total de reproducteurs. Enfin, l'expansion spatiale des pêcheries fait que n'existe aujourd'hui plus aucun refuge pour le thon rouge, et ses caractéristiques biologiques, notamment sa longévité et sa maturité tardive, le rendent plus fragile à l'exploitation qu'un thon tropical. Si rien n'est fait pour le protéger, sa biomasse risque d'atteindre un seuil biologique critique – en d'autres termes, les reproducteurs ne seront plus assez nombreux pour assurer le renouvellement des générations – et cela risquerait d'avoir des conséquences irréversibles.

Le diagnostic est sans appel : la surexploitation du stock de thon rouge est forte. Les sérieux menaces d'effondrement pèsent sur le stock à moyen terme.

Nos enfants mangeront-ils du thon rouge ?

La CICTA a pris conscience de ces menaces depuis quelques années ; elle a décidé diverses mesures de gestion qu'elle a mises en œuvre au niveau international pour limiter les activités halieutiques sur le thon rouge. Toutefois, les scientifiques ont toujours considéré que ces mesures restaient insuffisantes et qu'elles étaient de surcroît peu ou pas appliquées, notamment dans certains pays méditerranéens.

En outre, comme nous l'avons mentionné, les captures réelles sont supérieures aux captures déclarées et légales ; et la taille des poissons capturés est souvent inférieure aux tailles limites autorisées. On utilise souvent des engins de pêche illégaux, ainsi que des avions de prospection – pour repérer les thons –, pourtant interdits. Cet échec flagrant de la gestion du stock est dû à la conjonction de multiples causes, la principale étant sans doute la difficulté de gérer des stocks partagés par différents pays pêcheurs ; la logique à court terme

Stocks et sous-populations de thon rouge

Le concept de stock désigne une unité géographique d'évaluation et de gestion des ressources halieutiques, qui est définie par les scientifiques.

Le concept est différent de celui de sous-populations biologiques qui représente des fractions de la population plus ou moins isolées et adaptées à un environnement spécifique. Par exemple les thons rouges qui sont nés en Méditerranée ou dans le golfe du Mexique.

Les scientifiques ont constaté les migrations transatlantiques du thon rouge depuis longtemps grâce aux marques.

En 1981, la Commission a décidé de gérer la population de thons rouges de l'Atlantique en supposant qu'il existait deux stocks : l'un dans l'Atlantique Est, l'autre dans l'Atlantique Ouest.

Cette frontière légale reste artificielle et elle montre aujourd'hui que la gestion doit être plus globale.

d'hui ses limites : le stock Ouest reste faible, malgré les quotas très bas mis en œuvre depuis 1981. Ce bas niveau

méditerranéen qui migre de façon saisonnière dans l'Atlantique Ouest.

La stratégie de gestion de la ressource tenant compte

de la structure biologique des sous-populations est donc indispensable pour bien la gérer.

ter la quasi-totalité de l'effort de pêche, ce qui est risqué. Enfin, certaines pêcheries asiatiques et de pays méditerranéens sont encore peu, voire pas du tout, contrôlées.

En conséquence, il faut réduire la capacité de pêche au thon rouge à l'échelle internationale (un effort local, même à l'échelon européen, ne serait pas suffisant). Les scientifiques considèrent que cette capacité est aujourd'hui deux à trois fois supérieure à la productivité naturelle du stock, c'est-à-dire la quantité de poissons que l'on peut pêcher sans mettre en danger la population.

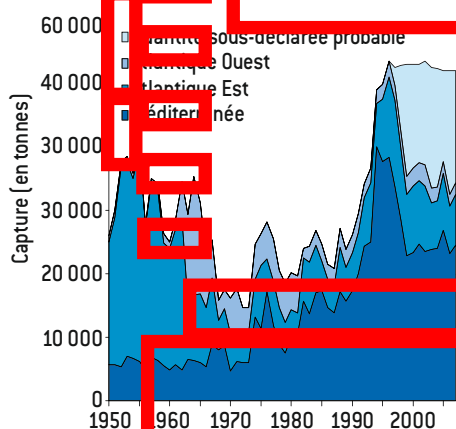
De plus, l'effondrement du stock de thon rouge risquerait d'être irréversible.

Le thon rouge joue probablement un rôle écologique majeur dans l'Atlantique Nord et en Méditerranée : la disparition de centaines de milliers de tonnes d'un tel prédateur du sommet de la chaîne alimentaire pourrait avoir des conséquences écologiques importantes en Méditerranée, même si elles sont difficiles à prévoir.

Des règles simples... à appliquer

La conservation du thon rouge est donc un défi urgent pour la communauté internationale. Fort heureusement, le potentiel de survie du thon rouge est facilité par deux facteurs : tout d'abord, la majorité des captures a lieu en Méditerranée, une mer de petite taille qu'il est potentiellement plus facile de contrôler qu'un océan. Ensuite, la majorité des captures est vendue sur le marché japonais du sashimi et du sushi. Le seul contrôle de ce marché serait tout aussi déterminant. De plus, on pourrait encourager le retour de pêcheries artisanales orientées sur des marchés locaux. Celles-ci ont en effet montré par le passé qu'elles étaient viables et durables.

Il est encore possible de sauver le thon rouge. Mais des actions importantes sont urgentes, notamment celles visant à la préservation des reproducteurs. Il faut également accepter le fait que la récupération du stock reproducteur sera lente, à cause de la longévité de l'espèce et donc des délais biologiques nécessaires à son renouvellement. Enfin, il faudrait que les politiques publiques deviennent plus actives quant au suivi des pêcheries et de la recherche. Sans des progrès importants dans ces deux domaines, il sera difficile d'améliorer la précision du diagnostic scientifique, ni notre compréhension de la biologie et de l'écologie de cette espèce.



4. LES CAPTURES DE THON ROUGE

officiellement déclarées depuis 1950 ont augmenté jusqu'en 1996, date à laquelle ont été mis en place les quotas. Les prises déclarées ont ensuite été limitées, mais celles-ci seraient inférieures aux captures réelles d'environ 30 pour cent.

LES AUTEURS



Alain FONTENEAU est directeur de recherche à l'IRD et Jean-Marc FONTENEAU est cadre de recherche à l'Ifremer.

de rentabilisation des flottes existantes, longtemps subventionnées par les États. L'exportation sur la conservation des ressources et des écosystèmes pour les générations futures.

Il résulte de ce contexte une situation qui devient critique et qui a provoqué les alertes lancées depuis 2006 par les scientifiques de l'ICHTA et par les Organisations non gouvernementales (notamment WWF et Greenpeace). Une prise de conscience s'opère peu à peu, et les décisions prises en 2006 et en 2008 par la commission de l'UE sont plus contraignantes, même si elles restent en deçà des recommandations des scientifiques.

Elles se traduisent par une augmentation de la taille minimale des thons autorisés à la pêche, un allongement de la période de fermeture de la pêche, et un quota plus faible (fixé à 22 000 tonnes contre 30 000 tonnes auparavant). De plus, l'Union européenne a renforcé les contrôles et encadre beaucoup plus les opérations de pêche des flottilles depuis 2008.

La situation n'est donc pas désespérée, d'autant que les reproducteurs, certes peu nombreux, semblent encore assurer le renouvellement des générations. Les canneurs basés dans le golfe de Gascogne qui visent chaque été les thons rouges juvéniles présentent des rendements assez stables. En outre, on constate depuis deux ans de fortes concentrations de juvéniles sur les côtes françaises et italiennes de Méditerranée. Mais un effondrement du stock reproducteur provoquerait une rapide baisse du nombre de juvéniles.

Toutefois, deux problèmes persistent. D'abord, les nouvelles réglementations font que le stock de reproducteurs va suppor-

Le nouveau site de Pour la Science est en ligne !

www.pourlascience.fr

Avec son nouveau site Internet, *Pour la Science* vous offre plus de contenu, plus de services, plus d'interactivité.

➔ Vous êtes abonné à *Pour la Science* ?

Retrouvez l'intégralité de votre magazine en ligne et téléchargez les articles de votre choix. Réagissez aux articles et posez vos questions à des experts. Découvrez chaque jour des contenus inédits.

➔ Vous n'êtes pas encore abonné à *Pour la Science* ?

Découvrez chaque jour des actualités scientifiques, des articles originaux, des photos, des vidéos... Achetez les articles de votre choix.

➔ Abonnez-vous en ligne en trois clics !

L'abonnement « papier » vous donne accès au magazine imprimé et à tous les contenus web.

L'abonnement « web » vous donne accès à votre magazine au format numérique.

➔ Et bientôt l'accès en intégralité aux archives !



À bientôt sur **POUR LA SCIENCE.fr**

Les cratères de météorites

Pierre Vincent

Les cratères d'impacts météoritiques sont produits par des explosions, qui laissent des signatures géologiques et minéralogiques caractéristiques.

En 1957, de retour à N'Djaména, la capitale tchadienne, après une mission au Tibesti, je découvre par hasard une image satellitaire de l'Ennedi. Sur ce plateau gréseux situé au Nord-Est du Tchad, on distingue une structure circulaire d'une quinzaine de kilomètres de diamètre dotée d'un important relief central. Un astrobolène ? En d'autres termes, un cratère d'impact météoritique ? L'étude en France de photos aériennes réalisées par l'Institut géographique national et l'armée de l'air confirme l'intérêt d'une mission sur le terrain afin de tester cette hypothèse. Grâce à Alain Beauvilain, un géographe bon connaisseur du Tchad, où il réside alors, elle a lieu l'année suivante. La structure n'est qu'à 35 kilomètres au Nord-Est de la palmeraie de Fada, mais la présence d'une zone minée nous empêche d'y parvenir avant l'été 1962. Nos constatons sur place que les roches du relief central

des astrobolènes – plaident en faveur d'un impact, mais n'en constituent pas une preuve suffisante. Outre d'éventuels restes de météorite – mais ils sont toujours absents dans les grands cratères –, la seule preuve irréfutable de la réalité d'un impact est la présence d'un métamorphisme de choc, c'est-à-dire d'une transformation des minéraux ou des roches due aux pressions et aux températures extrêmes d'un impact.

Pressions extrêmes

Or, de retour à Clermont-Ferrand, nous découvrons que nombre des échantillons rapportés du Tchad contiennent des quartz choqués. On désigne ainsi des cristaux de quartz qui, sous l'influence de la pression exercée avant brièvement régné pendant un choc, ont acquis le long de certains plans cristallins de très fines lamelles amorphes (non cristallines).

De plus, le cratère de Gweni-Fada a été homologué par la base internationale de données des impacts maintenue par le Centre de sciences spatiale et planétaire de l'Université du Nouveau Brunswick au Canada. Il suffit de taper les mots-clés *Gweni-Fada crater* dans le logiciel *Google Earth* pour le contempler.

Du reste, l'importance des images satellitaires dans la découverte de possibles cratères à la surface de la Terre ne cesse de se confirmer. En 2005, Arthur Hickman du Service géologique australien a découvert à l'aide de *Google Earth* une structure ronde à l'Est de l'Australie. Sur le site internet, elle est déjà présentée comme un « probable cratère météoritique nouvellement découvert », et il suffit d'y taper *Hickman crater* pour l'observer. Elle est actuellement en voie d'homologation, après la découverte sur place d'impactites, c'est-à-dire de roches transformées par un impact météoritique.



© Sanjiv/Alto/Corbis

Ces deux cas sont typiques de la prudence, mais aussi de la vitesse avec laquelle progresse l'impactologie, c'est-à-dire l'étude des impacts météoritiques. Dans cette science jeune et faisant appel à de nombreux domaines des sciences de la Terre et de l'Univers, on repère de plus en plus souvent une structure candidate grâce à l'imagerie satellitaire – et à la chance ! –, puis on confirme son éventuelle nature météoritique par une scrupuleuse étude géologique du terrain et par des examens de laboratoire, afin de trouver des preuves minéralogiques irréfutables d'un métamorphisme de choc. Après avoir évoqué la naissance de l'impactologie, nous expliquerons ici le processus physique de la formation d'un cratère d'impact météoritique, et quelles structures et roches reconnaître pour identifier à coup sûr la réalité d'un impact.

L'étude des cratères débute en 1609, quand Galilée, peinant sa lunette sur la

Lune, remarque l'omniprésence de structures circulaires. Par des méthodes ingénieuses, il montre qu'il s'agit de dépressions pourvues ou non de reliefs centraux, dont il parvient même à estimer la hauteur. L'illustre physicien ne propose aucune explication sur l'origine de ces structures, mais il pose un problème, qui reste ensuite un sujet récurrent chez ses successeurs : les cratères sont-ils des vestiges d'impacts ou de volcans ?

L'hypothèse des volcans

Toutefois, au cours des siècles qui suivent les découvertes de Galilée, les géologues tendent à voir un volcan dans tout cratère. On les comprend : les hommes ont souvent vu se former des cratères volcaniques, mais jamais de cratères d'impact...

C'est cette persistance dans l'interprétation des cratères lunaires qui explique

L'ESSENTIEL

✓ Parce que les cratères d'impact étaient pris pour des volcans, l'étude des impacts, l'impactologie, n'a vraiment commencé qu'au XX^e siècle.

✓ L'impact d'une météorite se fait en trois étapes – compression, excavation, modification –, qui expliquent la forme du cratère.

✓ Les caractéristiques des roches d'impact – les impactites – dépendent de la masse et de la vitesse de l'impacteur et de la nature des terrains où il explose.

pour une large part l'étonnant retard qu'a pris l'impéologie. Très tôt, pourtant, des géologues remarquent que contrairement aux cratères de la Lune, les cratères volcaniques terrestres ne se rencontrent que dans certaines régions. Dès lors, pourquoi sont-ils omniprésents sur la Lune? Et pourquoi sont-ils toujours circulaires, rétorquent les partisans de la thèse volcanique? Les impacteurs arrivant *a priori* de l'espace sous tous les angles possibles, ils ne peuvent que laisser des traces elliptiques, comparables à celles des boulets de canon. Longtemps, cet argument passa pour imparable. Depuis, on a appris que pourvu qu'elle ait une masse suffisante (de l'ordre de 100 tonnes), une météorite hypervélocité ne heurte pas le sol comme un boulet, mais y explose comme un obus! C'est pourquoi son arrivée produit un cratère circulaire. Ensuite vinrent les missions *Apollo*, et s'imposa la certitude que les cratères lunaires sont principalement dus à des impacts.

La même polémique s'est longtemps poursuivie à propos des astrobombes terrestres. Le cas historique du *Barringer Meteor Crater* en Arizona l'illustre bien. Ce cratère, qui porte le nom du pionnier de l'impéologie D. Barringer, est une structure cir-

culaire de 1100 mètres de diamètre et de 145 mètres de profondeur, dont les flancs dominent le désert environnant de 45 mètres. Ses couches sont rebroussées vers l'extérieur, voire déversées. À l'extérieur du cratère et jusqu'à environ sept kilomètres, le sol est jonché de milliers de fragments d'une météorite de fer.

Dès 1903, et malgré l'avis contraire des scientifiques, Barringer est convaincu que cette dépression résulte de l'impact d'une météorite métallique de dix millions de tonnes. Un trésor minier, donc. Pendant 20 ans, il fait des forages pour atteindre le corps métallique géant qu'il pensait trouver sous le dépôt du fond. C'est un échec, bien qu'il ait atteint 150 mètres de profondeur, ce qui conforte ceux qui dou-

Seul contre tous

Toutefois, en 1929, l'astronome F. R. Moulton lui donne raison : il démontre par le calcul que l'impact d'une météorite peut produire une explosion capable de créer un tel cratère. Un détail toutefois désespère Barringer : l'énergie mise en jeu est telle que, selon l'astronome, la matière qui

constitue la météorite a certainement été volatilisée au moment de l'impact. En outre, d'après ses calculs, un corps de 500 000 tonnes se déplaçant à 10 kilomètres par seconde aurait suffi à produire le cratère. Puisque son énergie cinétique est comme le carré de sa vitesse, s'il avait une vitesse double, une masse quatre fois inférieure aurait suffi... Pour Barringer, c'est une catastrophe. En recherchant la précieuse masse de métal de la météorite, il s'est ruiné et a ruiné ses associés. Quelques jours après avoir pris connaissance des résultats de Moulton, il est emporté par une attaque cardiaque... Sur le plan scientifique, pour autant, c'est un succès. Dans les années qui suivent la mort de Barringer, la plupart des scientifiques admettent qu'il avait raison. Son erreur est d'avoir surestimé le freinage de l'atmosphère, ce qui l'a conduit à surestimer la masse de l'impacteur...

Après la mort de Barringer, les études suscitées par la controverse du *Meteor Crater* se sont poursuivies, mais comme elles étaient dispersées, elles n'ont guère attiré les géologues. Ce n'est qu'en 1989 que Jay Melosh publia un ouvrage, qui, pour la première fois, faisait une synthèse de

METEOR CRATER : PROTOTYPE DU CRATÈRE SIMPLE

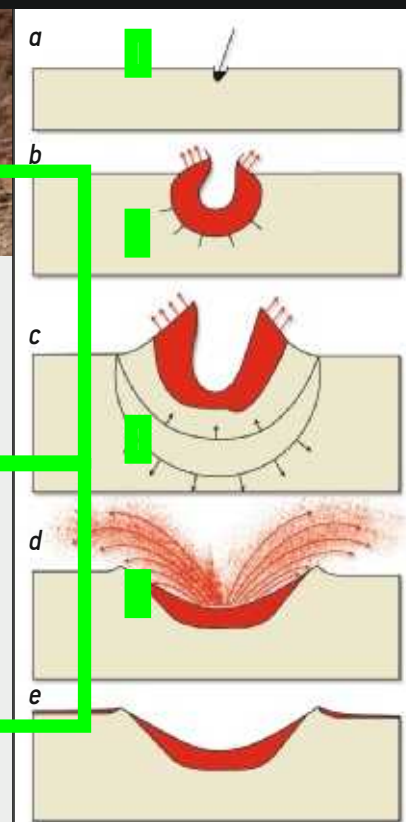
Le *Barringer Meteor Crater* est l'un des rares cratères simples bien conservés de la Terre. Il s'est formé, il y a quelque 50 000 ans, lors de l'arrivée d'une météorite ferreuse sur le plateau sédimentaire du Colorado. D'environ 150 000 tonnes, la masse résiduelle de ce corps se déplaçait d'une dizaine de kilomètres par seconde suivant un axe incliné de 80 degrés par rapport au sol lorsqu'elle a heurté un empilement de grès, de calcaire, de dolomite et de sédiments argileux (a). Les ondes de choc produites par la compression de ce corps (b) se sont propagées dans les roches (c), puis ont été d'abord réduites en un magma ultrachaud, puis rejetées sur les côtés (d) tandis qu'une partie de la masse comprimée par le choc était éjectée



sur les côtés (e). La collision aurait dégagé une énergie équivalente à 150 fois celle de la bombe d'Hiroshima, éjectant 175 millions de tonnes jusqu'à 200 kilomètres, mais pour l'essentiel à quelques kilomètres. En a résulté un cratère en forme de bol de 1100 mètres

145 mètres de profondeur à partir de bordures dominant le désert d'environ 45 mètres.

Les cratères simples bien conservés sont rarissimes sur la Terre, car l'érosion les fait disparaître vite à l'échelle géologique, mais on les dénombre par milliers sur la Lune. Si, considéré comme tel, le *Meteor Crater* est le cratère simple terrestre ayant suscité le plus de travaux scientifiques.



la physique du déroulement d'un impact. Il y distinguait trois phases.

La première est la phase de contact et de compression. C'est la plus brève : entre le moment où l'impacteur touche la cible et celui où il est stoppé, ne s'écoulent que quelques fractions de seconde, pendant lesquelles l'essentiel de l'énergie cinétique est transmise à la cible. L'impacteur s'y enfonce, en repoussant et comprimant ses matériaux. Leur résistance ralentit l'impacteur, qui est rapidement stoppé, tandis que les matériaux de la cible sont brusquement accélérés. Ce phénomène produit des ondes caractérisées par des vitesses, des énergies et des puissances dissipées bien plus grandes que celles des ondes mécaniques habituelles : ce que l'on nomme des ondes de choc.

Une partie de ces ondes de choc se propage dans l'impacteur, puis se réfléchit en une onde dite de raréfaction (ou de tension) qui entraîne sa volatilisation ou sa fusion, et le jaillissement d'un panache hypersonique chargé de matériaux choqués. Cette brève phase ne concerne qu'un volume comparable à celui du projectile (stage b de l'encadré page 42). Il semble que ce soit à cette étape précoce de l'impact

que se forment et sont expulsées hors du cratère les éjectes, ces fragments de roches fondus caractéristiques de certains grands impacts. Celui du Ries en Allemagne est par exemple à l'origine des moldavites, des tectites que l'on retrouve en Bohême, à près de 100 kilomètres du cratère.

Puis commence la phase d'excavation, pendant laquelle se forme un premier cratère : le cratère transitoire. La zone où l'impacteur a été stoppé et volatilisé est entourée d'une enveloppe hémisphérique d'ondes de choc qui divergent à grande vitesse. Elles se propagent dans la cible jusqu'à plus de dix kilomètres par seconde, puis leurs effets s'atténuent jusqu'à devenir comparables à ceux des ondes sismiques. Dans le cas des grosses météorites, il arrive que les ondes de choc parviennent aux antipodes.

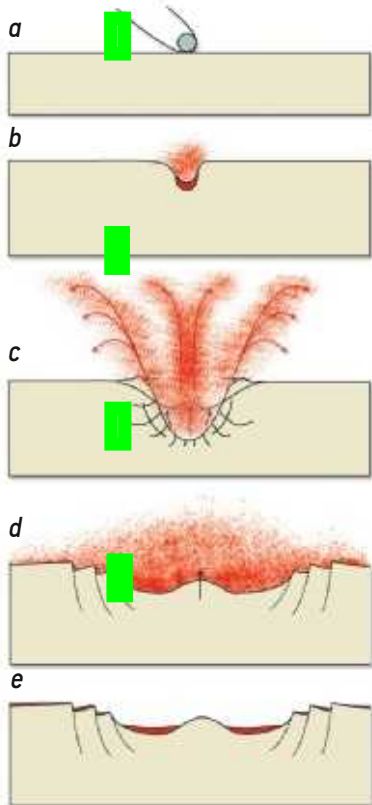
Partout où ces ondes passent, la pression, la température et la densité augmentent extrêmement vite. La pression, par exemple, atteint quasi instantanément des millions d'atmosphères (soit des centaines de gigapascals), ce qui dépasse de très loin ce que peuvent supporter les matériaux de la cible. Leur structure la plus intime, leur structure minéralogique, en est transformée, les minéraux se décomposent

L'AUTEUR



Pierre VINCENT, volcanologue, professeur honoraire de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, est un ancien membre du Laboratoire CNRS Magma et volcans de cette université.

LE RIES : PROTOTYPE DU CRATÈRE COMPLEXE



Le Ries est le grand cratère d'impact le mieux conservé de la Terre. Il s'est formé il y a environ 15 millions d'années lors de l'arrivée d'une météorite sur le Jura souabe en Allemagne. Aujourd'hui, il ne se distingue pas clairement à cause de sa dimension et de l'érosion, mais apparaît vu du ciel comme une chaîne de collines couvertes de forêts. À certains endroits, sa bordure révèle la pente et les roches choquées typiques des bords de cratères d'impact (ci-contre en bas).

La météorite aurait eu un diamètre d'environ 1,5 kilomètre et serait arrivée avec une vitesse de 15 à 20 kilomètres par seconde (a), ce qui a engendré une explosion de plusieurs centaines de milliers de fois la bombe d'Hiroshima (b) projetant plus de 150 kilomètres cubes de roches sédimentaires et de roches cristallines éjectées au sol sous-jacent jusqu'à 70 kilomètres (c), voire 450 kilomètres pour certains éjectas (tectites).

Sa formation a suivi au début la même séquence que dans le cas d'un cratère simple, aboutissant à la formation d'un cratère transitoire en bol, puis s'est produit un rebond dont a résulté un soulèvement central (annulaire au Ries, différent ailleurs), tandis que l'extension sous le cra-



tère et autour d'un réseau de failles concentriques produisant en surface une série de terrasses concentriques (e).

En raison de sa relative jeunesse – moins de 20 millions d'années – une partie des produits projetés hors du cratère est conservée, et bien exposée grâce à des carrières. Le cratère recoupant à la fois des formations sédimentaires variées et leur socle granitique, l'impact du Ries a produit une très grande variété d'impactites, c'est-à-dire de roches formées par l'impact.

C'est sans doute aussi celui qui a suscité le plus de travaux, ce qui en fait le modèle de référence pour les cratères complexes.

AOROUNGA : LA SYMÉTRIE PARFAITE



La structure d'Aorounga (*ci-dessus*) est située dans la plaine désertique du Borkou, à 130 kilomètres au Nord de l'oasis de Faya. Elle est entièrement contenue dans les grès paléozoïques (plus de 290 millions d'années) – qui à cet endroit ont environ 2 000 mètres d'épaisseur –, aucun élément du Précambrien sous-jacent n'ayant été trouvé dans ses produits d'impact. La présence sur place de verre laissait espérer la découverte de traces de fission, mais les essais n'ont pas abouti, car les échantillons que nous avons prélevés sur place étaient altérés.

Dans sa structure, Aorounga est un cratère complexe, d'un diamètre de 16 km, contenant un soulèvement central annulaire de grès anciens, soulevés, basculés et partiellement érodés, qui entoure une dépression cen-

trale en inversion de relief (*ci-contre*). L'élargissement du cratère initial s'est fait par glissements gravitaires vers le centre de la couronne périphérique, le long de surfaces de glissement incurvées, expliquant les formes de guirlande de la limite externe. La dépression externe, remarquablement régulière, est limitée par une falaise circulaire continue (*ci-dessous*). Sur le plateau central, des impactites (roches produites par l'impact) forment une couche qui a dû être continue initialement : il s'agit de sévite à grains fins et de verres. Au contact, les grès sous-jacents sont rouges, ce qui atteste de la haute température qui a suivi l'impact.

Aorounga est un site idéal pour l'étude détaillée des déformations subies lors d'un impact planétaire. Les strates initialement horizontales – un cas peu fréquent, bien que son étude en soit au stade de la reconnaissance.



des quartz choqués décrits au début. Ainsi, dans toute la partie de la roche-cible où la tension de l'onde de raréfaction (la tension subie par le matériau du fait de l'onde) est supérieure à la résistance des matériaux, les roches sont volatilisées ou fondues : dans les zones plus profondes où ce n'est plus le cas, elles sont fragmentées, puis fracturées (*figures c de l'encadré page 42*).

Dans un grand impact, le contact, la compression, la décompression et le passage de l'onde de choc ne durent que quelques dixièmes de seconde. Au cours de ce processus ultrabref, les roches qui constituent la cible sont accélérées, et s'éloignent à grande vitesse du point d'impact. Dans la partie superficielle, elles sont éjectées vers le haut et sur les côtés, ce qui produit les éjectas que l'on retrouve autour du cratère. Au-dessous, elles s'enfoncent.

Champignon d'impact

Le cratère transitoire (ou initial) est excavé par tous ces processus. Il a la forme d'un bol, dont les bords, constitués de strates rebroussées, sont recouverts d'éjecta. La profondeur totale du cratère est due pour environ un tiers à l'excavation des éjectas et pour deux tiers à l'enfoncement du plancher. On estime qu'environ six secondes sont nécessaires pour former un cratère

LES IMPACTITES DES ROCHES PRODUITES PAR IMPACT

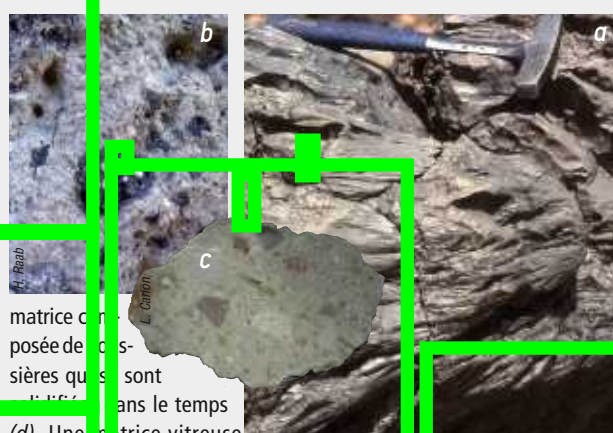
Le terme impactite désigne toutes les roches transformées par un impact météoritique ou formées dans ou autour de son cratère. Ainsi, il inclut les roches fondues

et toutes les roches qui ont été réduites en débris, ainsi que toutes leurs combinaisons. Les impactites les plus reconnaissables à l'œil nu sont les cônes de percussion, des structures rocheuses marquées de nombreux demi-cônes résultant

de la roche à une pression de dizaine de milliers d'atmosphères (*a*), des cônes de percussion trouvés dans le cratère d'Aorounga au Tchad). Les impactites les plus communes sont les brèches d'impact, des conglomérats de débris, de roches fondues et de roches choquées liés

et toutes les roches qui ont été réduites en débris, ainsi que toutes leurs combinaisons. Les impactites les plus reconnaissables à l'œil nu sont les cônes de percussion, des structures rocheuses marquées de nombreux demi-cônes résultant de la roche à une pression de dizaine de milliers d'atmosphères (*a*), des cônes de percussion trouvés dans le cratère d'Aorounga au Tchad). Les impactites les plus communes sont les brèches d'impact, des conglomérats de débris, de roches fondues et de roches choquées liés

À gauche, trois sortes de brèches : en haut, un mélange de fragments de gneiss, de granite, de quartz, et de leptinite lié par une



mée dans le cratère à proximité, là où du matériau fondu et des débris se sont mêlés. Deux autres brèches

transitoire de un kilomètre, tandis qu'environ 90 secondes le sont pour former un cratère transitoire de 200 kilomètres.

Un champignon de matériau vaporisé se forme très vite au-dessus de la cavité, comparable aux champignons atomiques produits par les explosions nucléaires atmosphériques. Ce panache pourra même dépasser la haute atmosphère et s'étendre dans l'espace au-dessus de toute la surface de la Terre. Cela s'est par exemple produit lors de la formation du cratère géant de Chicxulub, il y a 65 millions d'années. La poussière de son panache a produit en retombant la strate riche en iridium, à l'origine de l'interprétation météoritique de la disparition des dinosaures.

Une part du matériau fondu est éjectée sur les côtés et forme les brèches (conglomérats rocheux) contenant des éléments vitreux que l'on nomme suévites, mais reste surtout à l'intérieur du cratère transitoire qu'elle recouvre. On estime l'énergie d'un impact suffisante pour faire fondre ou volatiliser un volume de cible allant jusqu'à 1 000 fois celui du projectile. Dans le cas du cratère de Sudbury au Canada, ce volume fut par exemple de plus de 1 000 kilomètres cubes : un réservoir magmatique comparable à celui d'un grand volcan, mais à ciel ouvert, exista alors pour un temps. Toutefois, la plus grande partie du matériel éjecté a été déposée à quelques rayons de cratère seulement, par voie balistique ou par éjection latérale.

Finalement, la phase de modification s'enclenche. La violence de l'impact est maintenant consommée, mais le cratère transitoire est instable. La gravité va immédiatement le modifier : en moins d'une minute pour les petits cratères transitoires et en quelques minutes pour les grandes structures. L'importance des modifications effectuées par la gravité varie beaucoup, en fonction de la taille du cratère. Dans le cas des petits cratères – ceux de moins de quatre kilomètres de diamètre –, la bordure s'écroule en partie, ce qui augmente quelque peu le diamètre initial. Ce phénomène est associé au glissement de divers blocs et autres débris dans la cavité. Ce remplissage réduit de moitié la profondeur du trou : il en résulte un cratère en forme de bol que l'on nomme cratère simple parce qu'il ressemble assez au cratère transitoire initial.

Au-dessus d'une certaine taille de l'impacteur, les processus de transformation de la cavité transitoire sont bien plus compliqués, d'où ce que l'on parle de cratère

complexe. Les processus déjà décrits dans le cas des petits impacts sont aussi à l'œuvre, mais avec une plus grande ampleur. Le cratère s'élargit par effondrement des parois, avec formation de terrasses concentriques descendant vers la région centrale qui est au contraire soulevée pour former un piton central. Toutefois, dans les cratères de plus de 20 ou 25 kilomètres de diamètre, le piton central est remplacé par une couronne de reliefs (*peak ring*) entourant une dépression sommitale. Les géométries résultantes ne sont pas sans rappeler les formes de rebond produites par un liquide juste après qu'une goutte y est tombée. En fait, tout se passe comme si l'énergie dissipée dans le milieu le rendait provisoirement fluide,

GWENI-FADA : UN IMPACT OBLIQUE

Le cratère d'impact de Gweni-Fada est situé dans l'Ennedi, au Nord-Est du Tchad, dans une zone semi-désertique. Son âge est inconnu, mais il doit être nettement plus jeune que les formations perturbées.

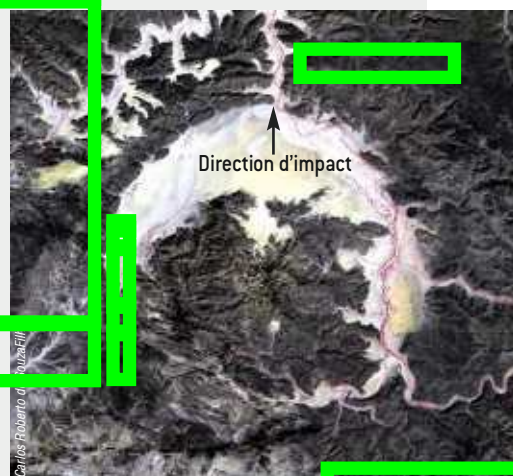
Nous avons récemment reconnu ce cratère complexe de 22 kilomètres de diamètre ; il présente plusieurs caractéristiques inhabituelles, dont une forte dissymétrie de son complexe central (*ci-dessous*). Malgré son érosion, la structure centrale a préservé sa forme originale. Le rempart externe est continu, seulement interrompu au Sud-Sud-Ouest par un important effondrement des terrasses, venues buter en se plissant et se chevauchant contre le soulèvement central. Celui-ci, anormalement large, est déplacé vers le Sud par rapport au centre géométrique, ce qui donne une forme de croissant à la dépression, partiellement comblée de dépôts lacustres, qui l'entourent. Le piton central est ainsi à plus de 500 mètres de la bordure externe. On remarque aussi que le complexe central est ouvert vers le Nord, suivant une forme dite « en pince de homard ».

Ces caractères particuliers sont connus sur Terre dans l'astrobème de Manson dans l'État de l'Iowa, où il a été montré qu'ils résultent d'un angle d'impact de la météorite inférieur à 30° par rapport au sol. Cette interprétation résulte d'études expérimentales, et de comparaisons avec les structures présentes sur d'autres cratères météoritiques bien datés et observable. L'exemple du cratère King, situé sur la Lune, est particulièrement intéressant. Le mieux Gweni-Fada.

Les impactites du complexe central sont érodées, mais celles de la dépression doivent

subsister sous les alluvions lacustres. L'effondrement du flanc Sud s'est produit après le dépôt du complexe central, mais probablement à la suite d'un effondrement initial : le plissement des grès résultera de la dégradation temporaire de la résistance des matériaux liée à l'impact.

On sait que pour un même diamètre de cratère, la largeur du complexe central est plus grande pour un impact oblique, et que, dans tous les cas, celle-ci augmente avec l'érosion. Cependant, cela ne suffit pas à expliquer la taille anormalement importante du cratère de Gweni-Fada. En 1989, Jay Melosh, de l'Université d'Arizona, a déjà signalé que des cratères martiens avaient des pics centraux énormes, et il attribuait cela à la présence d'eau (liquide ou gelée) sous la surface. Cette interprétation peut s'appliquer à Gweni-Fada, qui est présente dans les grès paléozoïques de l'Ennedi en contact avec le substratum antécambrien imperméable.



✓ SUR LE WEB

<http://www.pl.arizona.edu/impacteffs/>

Earth impact database
<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>

de sorte que, quand il se fige, peut-être après plusieurs oscillations, il conserve une forme de rebond.

Le passage entre les conditions de formation d'un cratère simple à celles d'un cratère complexe se fait quand un seuil de résistance des matériaux a été atteint. Il a été calculé que ce seuil est facilement atteint étant donné l'énergie dissipée par unité de temps par un grand impact. Une fois ce seuil de résistance dépassé, les roches ne présentent qu'une très faible cohésion tandis que leur coefficient de frottement est devenu presque nul. La notion de fluidisation acoustique (une réduction des frottements entre débris rocheux due aux vibrations acoustiques) introduite par J. Melosh est celle qui rend compte de cette dégradation.

tance des matériaux. Ce domaine reste toutefois très débattu par les théoriciens.

Comment identifier un cratère d'impact ? Comme l'illustrent les exemples rapportés, le rôle des images satellitaires est devenu essentiel pour repérer les structures circulaires candidates. Pour autant, elles ne dispensent jamais d'une étude au sol.

Identification : au sol !

Pour y faire quelles constatations ? Tout d'abord, pour y étudier les caractéristiques de la structure, telles la géométrie du cratère, la présence de terrasses concentriques, d'un pic ou d'un pic central, etc. Mais certains astrolèmes, celui de Roche-

on ne trouve que très rarement des débris météoritiques, car, dans la plupart des cas, le matériau de l'impacteur est volatilisé, fondu et éjecté au loin.

En revanche, des brèches d'impact sont produites dans tous les cas. En géologie, le terme de brèches désigne des roches composées d'au moins 50 pour cent d'éléments rocheux fixés par un ciment naturel. Les brèches d'impact se forment à partir des éjectas, c'est-à-dire de débris de roches fondues, choquées, ou simplement broyées, et d'un remplissage provenant des éjectas fins. Il existe de nombreuses variétés de brèches d'impact, dont les plus remarquables sont sans doute les suévites, parce qu'elles contiennent des éléments vitreux, donc du matériel fondu. Les suévites ont été définies au Ries, où elles forment une couche de 400 mètres d'épaisseur dans le fond du cratère, puis reconnues dans de nombreux astrolèmes à travers le monde : elles sont typiques des dépôts qui remplissent les cratères.

Toutefois, outre les brèches d'impact, il existe des brèches sédimentaires, tectoniques, volcaniques... C'est pourquoi la présence de brèches n'est pas suffisante en soi pour caractériser un impact : il faut pour cela qu'elles présentent au niveau microscopique les preuves d'un métamorphisme de choc. Dans son livre faisant référence le géologue Bevan French, de la *Smithsonian Institution* de Washington, aux États-Unis, décrit en détail les roches perturbées

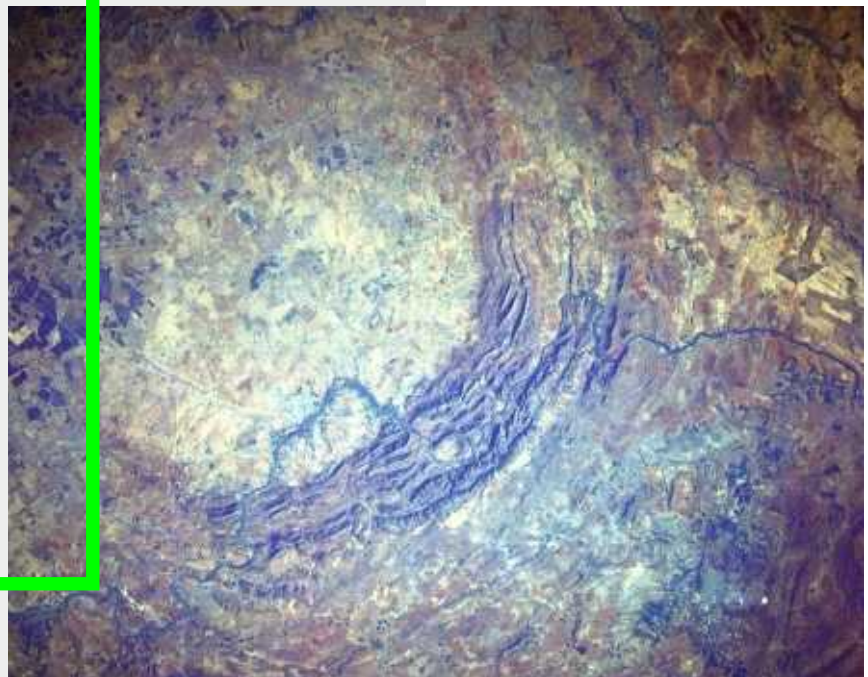
LE VREDEFORT, ASTROLÈME GÉANT

Le Vredefort est le plus grand cratère d'impact connu sur Terre. De 250 à 300 kilomètres, son cratère est plus large que les 250 kilomètres du cratère de Sudbury au Canada et que les 180 kilomètres du cratère de Chicxulub au Mexique (qui aurait causé la fin des dinosaures). L'astéroïde qui l'a créé aurait mesuré plus de dix kilomètres de diamètre.

L'astrolème de Vredefort (*ci-dessous, une vue satellitaire*) est aussi extrêmement ancien, puisqu'il a été formé en pleine ère précambrienne, il y a environ deux milliards d'années. Il est donc très érodé, toutes ses impactites ayant disparu depuis longtemps. Toutefois, les structures subsistantes indiquent qu'il s'agit de l'un des rares cratères à anneaux multiples de la Terre. Ce type de cratères est produit par les plus grands impacts. Les anneaux concentriques peuvent atteindre des centaines de kilomètres de diamètre. L'une des théories pour les expliquer est que l'impact crée dans la croûte terrestre d'immenses vagues qui se figent sous la forme d'anneaux. Elles sont rares sur Terre car, très anciennes, elles ont été érodées ou ont disparu. En revanche, elles sont conservées et faciles à observer sur les autres planètes telluriques et la Lune. Le bassin oriental sur la Lune, avec ses cinq anneaux, en est l'archétype.

L'une des conséquences géologiques majeures est que les plis ainsi créés (formant ce que les géologues nomment des synclinaux et des anticlinaux) sont autant de pièges à minéraux. C'est ce qui explique que la moitié de l'or produit en Afrique du Sud provient du coup d'uranium aient été extraits autour du Vredefort. Au-delà du cratère du Vredefort et de sa comarque, la formation du Witvaters-

rand, les formations circulaires qui font onduler les formations du Witvatersrand, ont longtemps été protégées de l'érosion par une couche d'impactites. L'or qui s'y est accumulé a été libéré par la destruction de filons au cours des temps géologiques. Il est actuellement conservé dans les synclinaux, particulièrement celui de la *Golden Belt*. Comme il est antérieur à l'impact, bien qu'une partie ait été détruite par l'impact, la tectonique thermique consécutive à celui-ci, c'est bien à la formation du cratère qu'il doit de ne pas avoir été érodé.



M/S4

LE CLOT DE CABREROLLES : SANS DOUTE UN FAUX CRATÈRE

Connu sous l'appellation « le Clot », ce petit cratère est situé dans l'Hérault, à 1,5 kilomètre au Sud du village de Cabrerolles. Il mesure 22 mètres de diamètre pour une profondeur de 50 mètres. Sa forme est circulaire, avec des parois abruptes et un fond plat planté de vigne (à droite). Il est creusé dans des grès et des schistes carbonifères, ce qui semble exclure la possibilité d'une origine karstique (le creusement de roches carbonatées solubles, surtout du calcaire). C'est pourquoi, en 1950, les géologues Bernard Gèze et André Caille



P. Vincent

pouvait s'agir d'un cratère d'impact météoritique, l'argument principal étant qu'on imagine mal un

autre mécanisme capable de produire dans ce contexte un tel cratère. Cela a suffi à son inscription sur l'inventaire international des cratères d'impact, mais il en a été exclu en 1977, les critères d'inscription étant devenus plus rigoureux... Les quelques recherches effectuées depuis n'ont pas permis de trouver des arguments en faveur de l'hypothèse de l'impact. Les impactites (cônes de percussion) se sont révélées ne pas en être, et aucun quartz choqué n'a été trouvé à ce jour. Dans un cratère d'impact simple,

une origine karstique profonde est possible : les couches de calcaire dévonien, qui affleurent un kilomètre au Nord du Clot, se poursuivent profondément au-dessous. L'effondrement d'une cavité formée par érosion karstique (les calcaires se dissol-

vent dans l'eau) pourrait donc être à l'origine du Clot. Plus au Nord, dans les calcaires, deux autres dépressions fermées de plus petite taille sont visibles.

dans leur structure intime, donnant ainsi une définition au sens large des impactites.

Quelles sont les impactites possibles ? Les seules vraiment évidentes à l'œil nu sont les cônes de percussion, nommés *shatter cones* en anglais (voir *L'encadré page 44*). Ces cônes se forment à partir de roches isotropes à grain fin, qui ne sont pas présentes

decrètes pour la première fois dans l'astrolène du Vredefort, en Afrique du Sud. Ces roches vitrifiées par frottement ne sont pas spécifiques des impacts, mais elles en fournissent un indice important quand elles sont associées à une tectonique particulière.

Tandis que les impactites sont formées pendant la propagation des ondes de choc, d'autres roches peuvent l'être pendant la modification du cratère transitoire. Ainsi, comme à Rochechouart, il est apparu que les glissements de blocs à l'origine des terrasses peuvent produire un verre : la pseudocanyonite.

L'intéressant bombardement des astres du Système solaire par des objets cosmiques n'a pas laissé sur la surface de la Terre les mêmes cicatrices que sur les autres planètes telluriques ou la Lune. Pour autant, même si la plupart des cratères terrestres ont disparu, on sait aujourd'hui le rôle géologique majeur joué par les cratères d'impact sur Terre. Soulignons que les cataclysmes d'origine cosmique ont joué un rôle essentiel dans l'évolution de la vie : tout indique qu'elle peut être interrompue par un événement qui la relance dans une nouvelle direction. Le bombardement cosmique de la Terre n'a certes plus l'ampleur qu'il avait au début du système solaire, mais l'impact de la comète Shoemaker-Lévy 9 sur Jupiter, en 1994, nous rappelle que la formation des cratères d'impact n'est pas seulement de l'histoire ancienne...

Impactites

Les autres impactites ne sont identifiables qu'au microscope. Elles contiennent des minéraux qui ne se forment qu'à très haute pression et haute température. Ainsi, la coésite et la stishovite sont des minéraux de silice qui proviennent de la transformation du quartz. Ce sont aussi les minéraux choqués, des minéraux initialement non isotropes, mais qui le sont devenus (on parle de minéraux isotropisés) ou encore des verres de fusion.

Le carbone ayant subi une pression extrême – le diamant – est assez fréquent dans les impactites, où il prend la forme de minuscules cristaux mesurant une fraction de millimètre. Ces cristaux résultent de la transformation de roches riches en carbone du graphite. Parmi les minéraux choqués, les quartz sont particulièrement utiles à l'identification d'un cratère, car ils sont très stables, même s'ils peuvent finir par disparaître eux aussi par recuit thermique ou recristallisation. Enfin, les pseudocanyonites ont été

✓ BIBLIOGRAPHIE

- P. M. Vincent et A. Beauvilain, *Découverte d'un nouveau cratère d'impact météoritique en Afrique : l'astrolène de Gwini-Fada (Ennedi, Sahara du Tchad)*, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 323, pp. 987-997, 1996.
- C. Koeberl et al., *Aorounga and Gwini-Fada impact structures, Chad : Remote sensing, petrography, and geochemistry of target rocks*, *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 40, n° 9-10, pp. 1455-1471, 2005.
- H. J. Melosh, *Impact Cratering. A Geologic Process*, Oxford University Press, 1996.
- B. M. French, *Traces of Catastrophes : A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*, Contribution 954, 120 p., Lunar and Planetary Institute, Houston, 1995.

Forage dans le plus grand cratère américain

1. CETTE VUE DE LA BAIE DE CHESAPEAKE

obtenue par satellite ne révèle en rien la présence sous-jacente du plus grand cratère météoritique des États-Unis, découvert fortuitement en 1990 !

Christian Koeberl

Il y a 35 millions d'années, une météorite de plusieurs kilomètres de diamètre a explosé dans la mer continentale de Virginie. L'astrolème marin ainsi créé est l'un des mieux conservés du monde.

L'origine des tectites d'Amérique du Nord est enfin révélée ! Les tectites sont des fragments de roches fondues expulsés très loin du cratère d'impact creusé par une météorite. On connaissait jusqu'à présent quatre grands champs de tectites au monde, dont celui du Ries en Allemagne qui s'étend sur plus de 400 kilomètres et un champ nord-américain. Toutefois, dans les années 1990, apparaissent des indices de l'existence d'un grand cratère d'impact sous la baie de Chesapeake dans l'État de Virginie. L'explosion qui le produisit serait la source des tectites nord-américains. C'est pourquoi, dans le cadre du Programme international de forage scientifique continental (*International Continental Scientific Drilling Program*), une campagne d'étude systématique par forage a

été menée. Je l'ai dirigée avec mes collègues Gregory Gohn, du Service américain de prospection géologique, Kenneth Miller, de l'Université Rutgers à Piscataway, et Volker Reimold, du Musée Humboldt pour les sciences naturelles à Berlin. Nous rendons compte ici de ses résultats.

Outre sur l'Atlantique, la baie de Chesapeake est le plus grand estuaire des États-Unis. Elle couvre 166 534 kilomètres carrés, et plus de 150 rivières s'y jettent. Le premier indice de l'existence du cratère est apparu en 1983, quand un carottage pratiqué à Atlantic City a livré une couche de perles de verre (des tectites) et de quartz échauffés (des microfragments) à la structure cristalline profondément altérée par le choc, soit autant de produits typiques d'un impact.

La découverte aurait pu être liée à un petit impact, donc seulement d'importance locale. Cependant, au cours des années 1990, le Service américain de prospection géologique a réalisé des forages et des mesures géophysiques, m'associant à cette étude. Progressivement, les indices d'un grand impact se sont multipliés, de sorte que, dès 1996, nous étions certains que la grande structure ronde perceptible sous le fond sous-marin ne pouvait être d'origine volcanique. Parmi ces indices, des quartz chocs étaient les plus certains, car ils sont toujours dus à un impact.

Comme dans le cas de l'impact du Chicxulub, réputé être à l'origine de l'extinction des dinosaures, il y a 65 millions d'années, c'est ensuite la prospection pétrolière qui a révélé toute l'importance du cratère de Chesapeake. Plus grande structure d'impact connue aux États-Unis, le cratère de la baie de Chesapeake mesure 85 kilomètres de diamètre. D'après sa taille et les datations, il résulterait de la collision avec la Terre d'une météorite de deux à cinq kilomètres de diamètre à la fin de l'Éocène (56 à 34 millions d'années). Aujourd'hui, plus rien n'en est visible, car il se trouve entre 300 à 500 mètres sous le fond de la baie.

Toutefois, il est particulièrement bien conservé, car il s'agit d'un exemple typique d'« impact humide », en d'autres termes de cratère produit par la chute d'une météorite dans la mer peu profonde d'un plateau continental. Ce type d'impact produit des cratères ayant la forme intérieure d'un sombrero retourné (voir la figure ci-contre). Très rare parmi les cratères reconnus, cette forme est celle des cratères produits par des impacts sous-marins. C'est le cas du cratère sous-marin de Mjölner situé entre la Norvège et le Spitzberg, ou encore de celui de Lockne, qui se trouve à terre en Suède, mais dont on pense qu'il fut formé à l'Ordovicien (448 à 444 millions d'années) par un impact en mer.

Ces constatations, qui rendent le cratère de Chesapeake particulièrement intéressant, ont favorisé le lancement en 2004 d'une campagne scientifique par le Programme continental de forage scientifique (*International Scientific Drilling Program*) et par le Service américain de prospection géologique. Avec C. Cohn, K. Miller et W. Reimold, j'en ai dirigé la partie scientifique. Le forage s'est avéré difficile, car les alternances de couches d'argiles gon-

flées d'argile et de strates de roches diverses nous ont obligés à plusieurs interruptions. Ainsi, le seul forage, réalisé en automne 2006 et au printemps 2007, a coûté deux millions d'euros, et a dû être interrompu. Malgré ces difficultés, nous avons finalement obtenu une carotte de 1,8 kilomètre de long, que nous avons étudiée ensuite pendant près de deux ans.

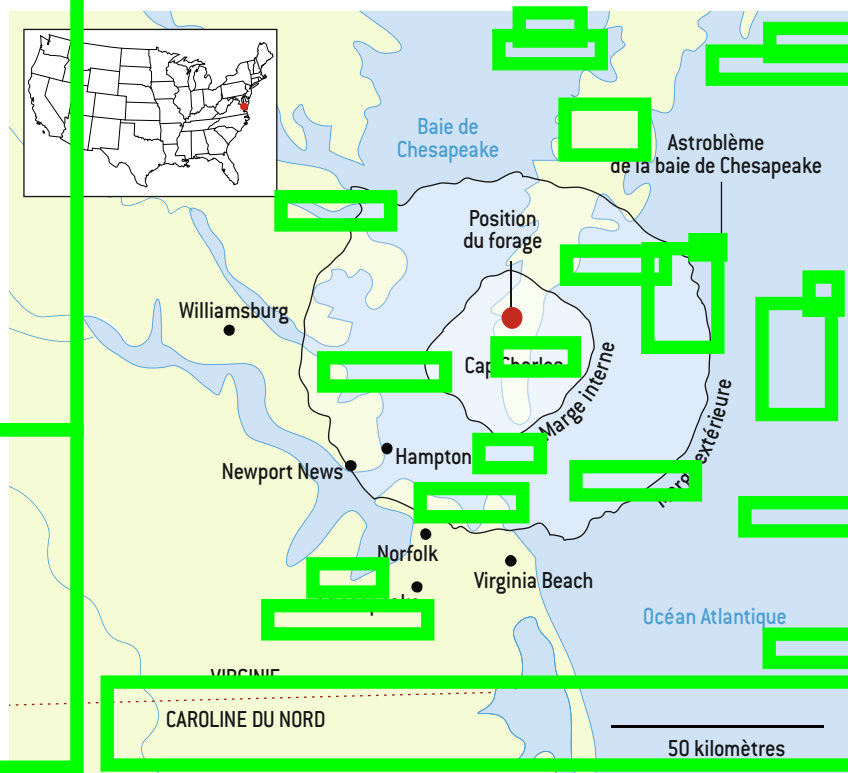
La forme du cratère de Chesapeake résulte de l'élasticité différentes des trois couches qui constituent la baie : la couche d'eau, celle de sédiments marins et celle des roches cristallines sous-jacentes. Ces dernières sont les plus dures, de sorte que l'étonnoir qu'y a creusé la météorite – le point du sombrero – est relativement petit. L'impact a aussi produit un large étonnoir dans le sédiment. Il a chassé l'eau de mer d'une immense zone, laquelle en fuyant, puis refluant, a charrié d'innombrables débris. Cette région bouleversée constitue le bord du chapeau.

D'environ 30 à 40 kilomètres de diamètre, l'étonnoir creusé dans le sédiment est plein de brèches, c'est-à-dire de débris de roches d'origines diverses, qui ont été mélangées au moment de l'impact.

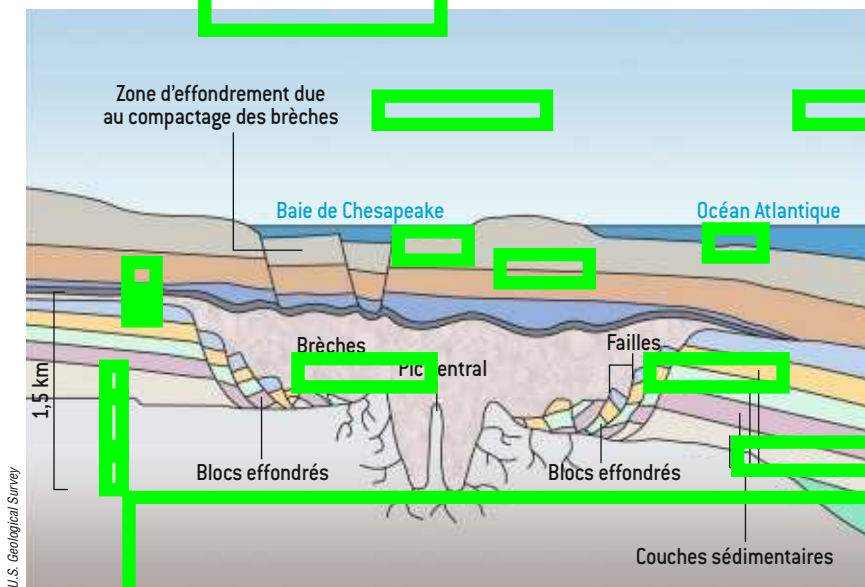
L'AUTEUR



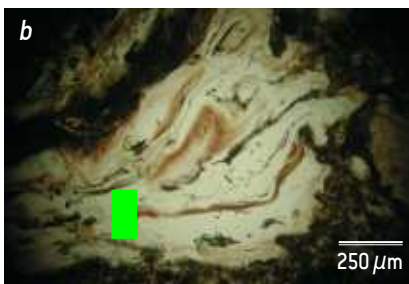
Christophe KOEBERL est professeur au Département de recherche sur la lithosphère de l'Université de Vienne, en Autriche.



2. L'ASTROBLÈME DE LA BAIE DE CHESAPEAKE est une structure de 30 à 40 kilomètres de diamètre enfouie sous 300 à 500 mètres de sédiments. C'est le cratère d'impact le mieux conservé en milieu marin.



3. LE PROFIL DU CRATÈRE DE LA BAIE DE CHESAPEAKE révèle l'ampleur du bouleversement géologique opéré par la chute de la météorite. Le choc a créé une énorme dépression remplie de débris, ce qui a modifié le cours des rivières locales (donnant à la baie sa forme particulière) et bouleversé la situation et le fonctionnement des aquifères, qui, pour la plupart, ne livrent plus qu'une eau saumâtre peu consommable.



Christian Koebel

4. LES BRÈCHES OBSERVÉES AU MICROSCOPE révèlent l'effet de l'impact. Un grain de quartz choqué (c) est strié de multiples fissures laissées par les cisailages dus à de violentes ondes de choc. Des coupes (a et b) de deux brèches d'impact révèlent des fragments de diverses roches ainsi que du matériel du fond figé.

Ces brèches sont caractéristiques de la présence d'un cratère météoritique ; c'est notamment le cas des cuévites, mélanges de fragments rocheux divers, mais aussi des quartz choqués produits par les impacts.

Dans les carottes, nous avons aussi découvert certaines brèches renfermant de l'eau de mer restée intacte depuis 35 millions d'années... Or pour couvrir les besoins des deux millions d'habitants vivant dans les villes entourant le cratère, de nombreux forages ont été réalisés à la recherche d'eau douce : ils n'ont produit que de l'eau saumâtre. Cette constatation étonnante s'explique par le piégeage d'eau de mer et donc de sel dans le sol. Notre découverte va donc permettre de localiser la zone de l'impact où l'eau souterraine est non salée – et par conséquent, les zones non polluées par l'impact, où les nappes phréatiques seront exemptes de sel.

Des traces de tsunami

Une autre surprise fut la découverte au cours de l'un de nos forages d'un immense bloc de granite enfoui sous les autres sédiments. De plusieurs centaines de mètres d'épaisseur et long de plus d'un kilomètre, il provient nécessairement d'une autre zone, car les bancs de granite les plus proches se trouvent à six kilo-

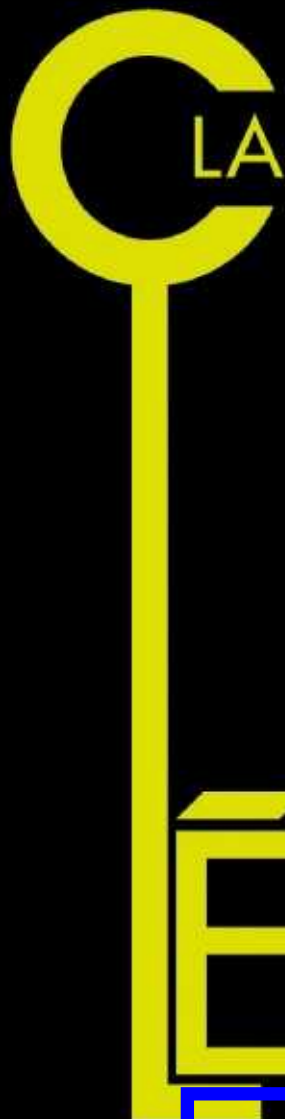
mètres. En outre, il a probablement franchi la distance séparant son origine de son lieu de dépôt en quelques minutes, voire quelques secondes et avant le reflux de la mer, car il se trouve coincé entre une couche de roches concassées, provenant du socle local, et le matériel chaotique charrié par la mer lors de son reflux. Sans doute aurait-il glissé à grande vitesse sur les pentes du cratère central, ce qui confirme le fait que les brèches sous-jacentes ont été broyées à l'état de gravier, voire de sable.

Les débris rocheux qui surmontent le bloc de granite ont eux-mêmes été amoncelés dans le cratère par le reflux de la mer. Dans les carottes, nous avons découvert les traces du passage d'un tsunami : une stratification définie partout dans le cratère, mais constituée d'un mélange particulièrement chaotique de débris divers, dont certains étaient situés dans des couches géologiques qui, avant l'événement, étaient séparées par des centaines de mètres d'épaisseur de sol !

Notre tsunami, pareille couche se reconnaît notamment à sa granulométrie, de plus en plus fine du bas vers le haut, caractéristique d'une sédimentation dans des eaux particulièrement agitées.

Notre étude nous a aussi livré d'intéressantes informations sur la structure géologique de la région, notamment sur les variations du niveau de la mer. Les géologues savent en effet dire si des sédiments ont été déposés sur terre ou sous l'eau, ce qui renseigne sur la position de la ligne des eaux à diverses époques. En outre, les fossiles marins piégés dans les sédiments correspondent souvent à des organismes dont on sait à quelle profondeur ils vivaient, ce dont on déduit à quelle profondeur ils se trouvaient quand ils ont été fossilisés. Tous ces éléments nous ont renseignés sur la tectonique locale, c'est-à-dire sur les mouvements et les déformations de la croûte terrestre locale dans la région. Nous avons également été surpris de découvrir que même à 1,8 kilomètre de profondeur, dans la partie chaude du cratère, certaines formes de vie ont réussi à se maintenir.

L'exploitation des données prélevées dans la baie de Chesapeake va encore durer plusieurs années, mais, grâce aux résultats déjà acquis, nous connaissons désormais bien mieux l'impact... géologique d'un impact... météoritique sur un plateau continental marin.



Pour la Science



Les Dossiers

76 €

seulement, au lieu de 102,50 €

Soit les Dossiers offerts !

DES SCIENCES



Renouvelez en plus l'intégralité de votre magazine en ligne et téléchargez les articles de votre choix compris dans votre abonnement sur www.pourlascience.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

☐ **Oui**, je m'abonne à **Pour la Science** (12 numéros) + les **Dossiers** (4 numéros) pour **1 an**

76 € au lieu de 102,50* € Participation aux frais de port : Europe (hors France) 12 € par an, autres pays 25 € par an.

☐ **Oui**, je m'abonne à **Pour la Science** seul (12 numéros) pour **1 an**

56 € au lieu de 74,70* € Participation aux frais de port : Europe (hors France) 12 € par an, autres pays 25 € par an.

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

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

Mes coordonnées (à remplir)

Nom, prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Pays : _____

E-mail** : _____

Téléphone** : _____

Date de naissance** : _____

Je règle par

☐ Chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte _____

Date d'expiration _____ Code de sécurité*** _____

Signature obligatoire _____

Comment éviter la prochaine PANDÉMIE ?

Un réseau international surveillant les transferts de virus entre les animaux et l'homme permettrait aux scientifiques d'éviter les grandes épidémies.

Nathan Wolfe

L'ESSENTIEL

- ✓ La plupart des maladies infectieuses humaines proviennent des animaux.
- ✓ Les épidémiologistes pensaient que les animaux domestiques étaient la source de ces fléaux.
- ✓ Mais les animaux sauvages ont transmis de nombreuses maladies, dont l'infection par le VIH.
- ✓ Les micro-organismes infectant les animaux et les personnes en contact avec eux sont étudiés pour que l'on repère rapidement les maladies infectieuses émergentes.

Nous étions dans la forêt de Kibale en Ouganda depuis presque cinq heures. Mais ils venaient d'arrêter leurs grognements et leurs hurlements, et nous les avions perdus. Soudain, nous les avons repérés : ils se tenaient au pied d'un grand figuier et regardaient un groupe de singes colobes rouges en train de manger et de jouer.

Les colobes ne se souciaient pas des trois grands singes. Ces derniers se séparèrent : pendant que le « chef » rampait vers le figuier, ses compagnons se glissèrent silencieusement vers deux arbres voisins. En un instant, le chef grimpa sur son arbre en poussant des cris perçants. Les colobes essayaient de fuir, mais l'un des chimpanzés en embuscade se saisit d'un jeune et le traîna au sol, prêt à partager sa prise.

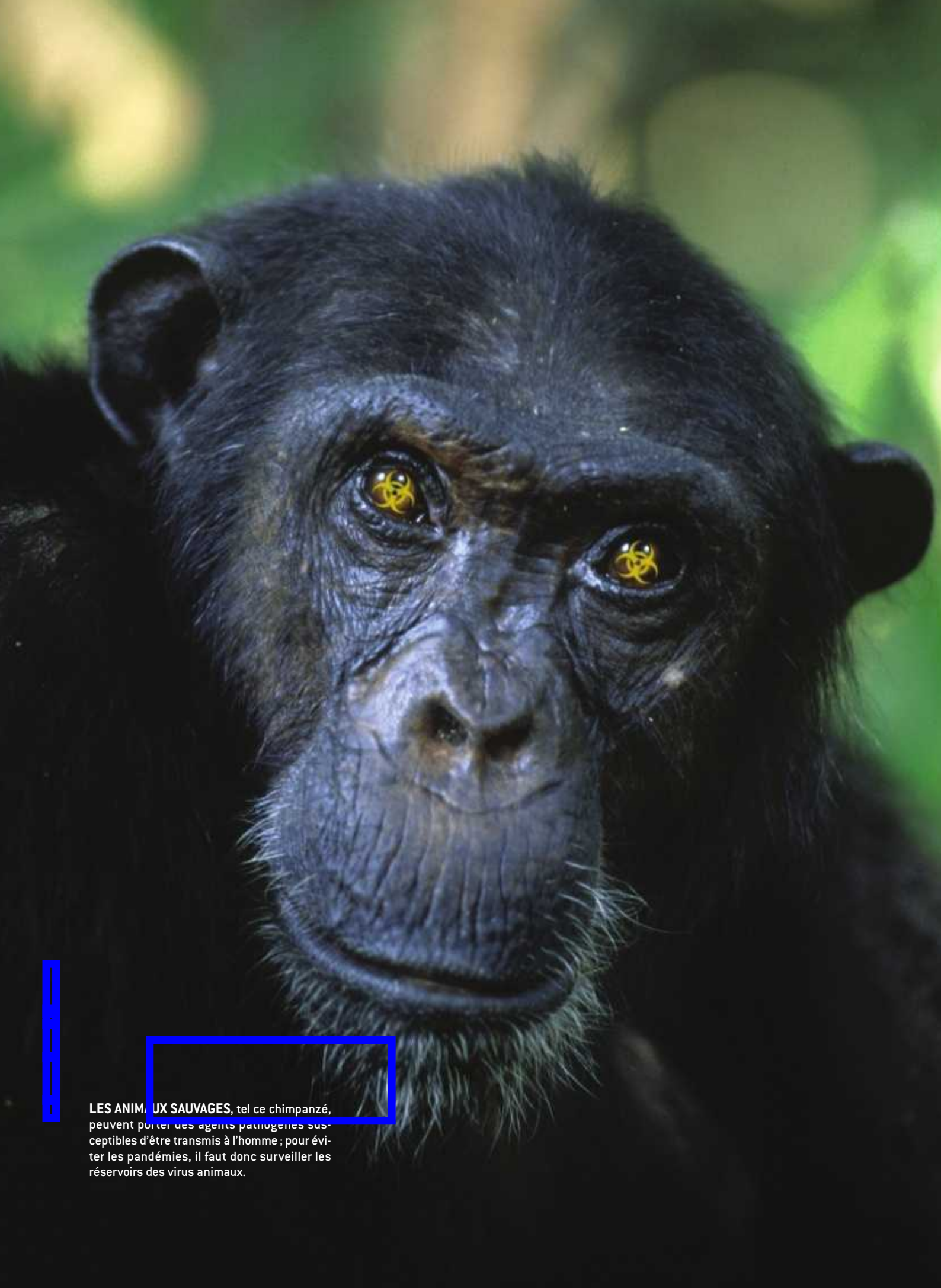
Les chimpanzés mangeaient la chair et les entrailles crues du petit singe ; je constatais alors que cette scène présentait des conditions favorables pour que des micro-organismes « sautent » d'une espèce à l'autre. Tout agent infectieux présent dans l'organisme du petit singe avait bénéficié des conditions idéales pour contaminer un nouveau type d'hôte : les chimpanzés manipulaient et consommaient des organes crus ; leurs mains étaient couvertes de sang, de salive et de fèces, qui peuvent contenir des agents pathogènes ; du sang et d'autres fluides organiques éla-

boissaient leurs yeux et leurs narines. Toute plaie sur le corps des chasseurs offrait une porte d'entrée vers le sang. De fait, avec d'autres équipes, nous avons montré que la chasse, par des animaux tels que les chimpanzés, mais aussi par les hommes, permet à des virus de passer de la proie au prédateur. La forme pandémique du sida est née de cette façon : le virus étant passé des singes aux chimpanzés et ensuite à l'homme.

La chasse au virus

Aujourd'hui, le virus de l'immunodéficience humaine, ou VIH, est si répandu qu'il est difficile d'imaginer le monde sans lui. Mais une épidémie mondiale, ou pandémie de sida aurait pu être évitée. Si dès les années 1960 et 1970, les scientifiques avaient recherché les signes de nouvelles infections chez les Africains, ils en auraient su davantage sur le virus avant qu'il n'infecte des millions de personnes. Avec un tel avantage dès le départ, les épidémiologistes auraient pu intervenir et ralentir la progression du virus.

Le VIH n'est pas le seul virus issu d'un réservoir animal (voir l'encadré page 54). Plus de la moitié des maladies infectieuses humaines proviennent des animaux, par exemple la grippe, le SRAS (le syndrome respiratoire aigu sévère), la dengue et la fièvre typhoïde. Et aujourd'hui, toutes les populations humaines sont reliées par les transports routiers et aériens, de sorte que de nouvelles maladies peuvent devenir pandémiques rapidement, qu'elles viennent directement des animaux sauvages, tel le VIH, ou indirectement, en passant



LES ANIMAUX SAUVAGES, tel ce chimpanzé, peuvent porter des agents pathogènes susceptibles d'être transmis à l'homme ; pour éviter les pandémies, il faut donc surveiller les réservoirs des virus animaux.

des animaux sauvages aux animaux domestiques, puis à l'homme, comme dans le cas du virus de l'encéphalite japonaise et de certaines souches du virus de la grippe.

Nous avons donc mis au point un nouveau plan pour surveiller les animaux sauvages et les personnes en contact avec eux ; l'objectif est de chercher des signes de nouveaux micro-organismes ou des changements du nombre des infections. Ce système de surveillance représenterait la première alerte nécessaire pour éviter les pandémies.

Il y a dix ans, au Cameroun en Afrique centrale, nous avons étudié des virus chez les villageois qui chassent et abattent des animaux sauvages, mais qui les gardent aussi comme animaux de compagnie. Nous voulions déterminer si de nouvelles souches du VIH pouvaient infecter ces populations humaines, et nous suspicions que ces chasseurs camerounais avaient un risque infectieux élevé.

Pourquoi pensions-nous que ces populations étaient vulnérables ? Considérons un chasseur vaquant à ses occupations. Ce dernier ne porte qu'un short en coton et il marche pieds nus le long d'un sentier forestier, portant sur le dos un babouin d'une vingtaine de kilogrammes. Il a transporté l'animal pendant plusieurs kilomètres, et il a encore un long chemin à parcourir avant d'atteindre son village. À mesure que le chasseur marche, le sang de sa proie se mélange à sa sueur et goutte le long de sa jambe, où existent peut-être quelques coupures. Tout agent infectieux contenu dans le sang du babouin risque de contaminer le chasseur.

Si ce chasseur avait le choix, il préférerait le porc ou le bœuf au singe. Mais les protéines animales sont rares : comme le font les hommes depuis des millénaires, le chasseur d'Afrique centrale chasse la faune locale. Ses proies lui permettent de survivre, mais elles sont susceptibles de lui transmettre des virus et autres micro-organismes. Au contraire, dans les pays développés, le cerf et le bœuf ne présentent pas ce risque, car ils ont un lien de parenté plus éloigné avec les hommes.

Il n'a pas été facile de persuader les villageois de coopérer avec nous. Beaucoup craignaient que nous nous emparions de leur gibier. Après avoir gagné leur confiance, nous avons pu recueillir des données ; en plus de prélever des échan-

L'AUTEUR



Nathan Wolfe est professeur de biologie humaine à l'Université Stanford, aux États-Unis, et directeur du programme *Global viral forecasting initiative*.

tillons de leur sang et de leur poser des questions sur leur santé et leurs activités de chasse. Nous leur avons demandé de récupérer du sang des animaux qu'ils avaient tués, au moyen de papiers-filtres que nous leur avions fournis.

Grâce aux analyses de sang, nous avons trouvé plusieurs virus animaux non observés auparavant chez l'homme. L'un de ces agents infectieux est le spumavirus simien ou SFV (pour *Simian foamy virus*), qui appartient à la même famille de virus – les rétrovirus – que le VIH. Le spumavirus simien existe chez la plupart des primates non humains, y compris les cercopithèques, les mandrills et le gorille du Cameroun, et chacune de ces espèces héberge son propre variant, génétiquement distinct, du virus.

Virus d'animal et d'homme

Nous avons découvert que ces trois variants viraux colonisaient aussi les populations de chasseurs. Par exemple, un homme âgé de 45 ans qui rapporta avoir chassé et abattu des gorilles – des animaux pourtant peu chassés – avait contracté le spumavirus du gorille.

Dans les mêmes populations d'Afrique centrale, nous avons découvert différents rétrovirus nommés virus T lymphotropiques humains (HTLV pour *Human T lymphotropic virus*) : ils infectent les lymphocytes T des cellules du système

Les maladies issues des animaux sauvages

La plupart des maladies infectieuses de l'homme proviennent des animaux sauvages. Il faut donc surveiller les micro-organismes de ces animaux sauvages, en plus de ceux du bétail. Voici dix de ces maladies et les animaux qui les auraient transmises à l'homme.

MALADIE	SOURCE
Sida	Chimpanzé
Hépatite B	Grands singes
Grippe de type A	Oiseaux sauvages
Peste	rongeurs
Dengue	primates
Maladie du sommeil d'Afrique	Ruminants sauvages et domestiques
Paludisme à vivax	Mosques asiatiques
Fièvre jaune	Primates africains
Maladie de Chagas	Différents mammifères sauvages et domestiques

La pandémie : une évolution en cinq étapes

Cinq stades sont nécessaires pour qu'un micro-organisme à l'origine d'une pandémie se transforme en un pathogène spécifique de l'homme. Les agents infectieux peuvent rester bloqués dans chacun de ces stades. Ceux des animaux, comme le virus Ebola par exemple, peuvent être des meurtriers, mais ils font peu de victimes, car ils ne peuvent pas se propager chez l'homme. Plus un virus est transmissible chez l'homme, plus il est susceptible de provoquer une pandémie.

EXEMPLES DE MALADIES

Le paludisme
à *Plasmodium reichenovi*

La rage

La fièvre Ébola

La dengue

Le sida

STADE 1 : Le pathogène est présent chez l'animal, mais pas chez l'homme.

STADE 2 : Le pathogène animal a été transmis à l'homme, mais ne se propage pas d'homme à homme.

STADE 3 : L'agent pathogène peut être transmis de personne à personne et provoque une épidémie, mais seulement pendant une courte période avant de s'éteindre.

STADE 4 : L'agent pathogène existe chez l'animal et est souvent transmis de l'animal à l'homme, mais il provoque aussi de longues épidémies dues à une transmission interhumaine.

STADE 5 : Le pathogène est spécifique de l'homme.

immunitaire. Deux de ces virus, le HTLV-1 et le HTLV-2, sont déjà connus, car ils touchent des millions de personnes dans le monde et entraînent des cancers et des maladies neurologiques chez certains malades. Mais HTLV-3 et HTLV-4, que nous avons découverts en 2005, étaient nouveaux. Étant donné la similitude génétique entre le HTLV-3 et son homologue simien, le STLV-3, il semble que ce virus ait été transmis *via* les singes infectés par le STLV-3 et chassés par l'homme. L'origine du HTLV-4 reste inconnue, mais nous découvrirons peut-être son ancêtre primate en explorant davantage ces virus simiesques.

Nous ignorons pour l'instant si le spumavirus ou ces nouveaux virus T-lymphotropiques humains provoquent des maladies chez l'homme. Les virus ne rendent pas toujours malades la personne qu'ils infectent, mais quand c'est le cas et s'ils se propagent d'un individu à un autre, ils n'engendrent pas toujours de pandémies ; la plupart du temps, ils s'éteignent spontanément. Mais comme ces virus sont de la même famille que le VIH, responsable d'une épidémie mondiale, les épidémiologistes doivent les surveiller de près.

Nous avons défini cinq stades permettant la transformation d'un pathogène

Et les animaux de compagnie ?

✓ Les animaux sauvages et ceux d'élevage ne sont pas les seules sources potentielles d'agents pathogènes humains. Les chiens, les chats et les rats – et d'autres animaux de compagnie – peuvent héberger des agents pathogènes pour l'homme. C'est le cas notamment quand les animaux de compagnie sont au contact d'animaux sauvages porteurs de germes. Ces derniers peuvent passer aux animaux de compagnie, qui les transmettent alors à leurs maîtres.



animal et un pathogène spécifique de l'homme (voir l'encadré ci-dessus). Dans le premier stade, l'agent infectieux est uniquement présent chez l'animal. Dans le deuxième, il peut être transmis à un homme par un animal. Au troisième stade, le germe se transmet surtout des animaux à l'homme, mais il peut aussi se propager parmi les hommes, avant de disparaître. Quand l'agent infectieux atteint le quatrième stade, il peut persister chez l'homme. Au dernier stade, il est un pathogène exclusif de l'homme et il n'a plus besoin d'être animal pour se multiplier et se propager. Les pathogènes des quatrième et cinquième stades peuvent causer des pertes humaines importantes.

Si nous avions observé les chasseurs africains il y a 30 ans, nous aurions peut-être détecté et stoppé le VIH plus tôt, avant qu'il ne devienne pandémique. Aujourd'hui il est trop tard. À présent, la question est : comment empêcher l'attaque de futurs virus ?

Comme il nous est possible d'étudier des populations éloignées, nous espérons étendre nos travaux pour suivre les transmissions des virus animaux aux hommes, partout où c'est envisageable. À l'échelle de la surveillance mondiale, nous pourrions



- Pays : Cameroun
- Virus déjà observés : VIH
- Population étudiée à la recherche de nouveaux pathogènes : les chasseurs d'animaux sauvages.

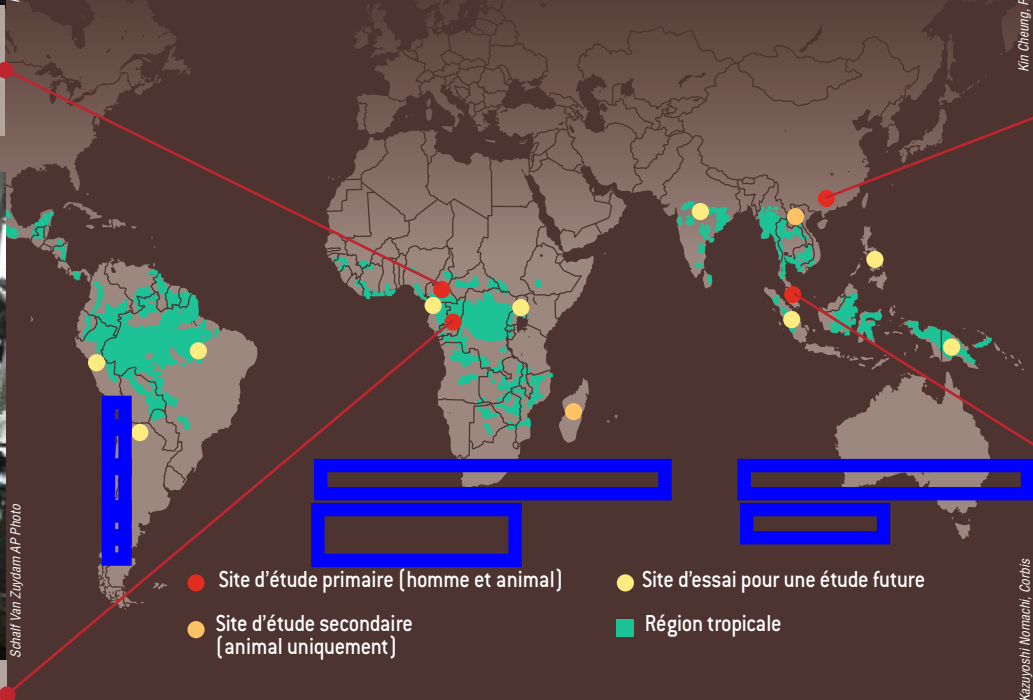


- Pays : République démocratique du Congo
- Virus déjà observés : le virus de Marburg, le virus de la variole du singe, le virus Ebola
- Population étudiée : les chasseurs d'animaux sauvages.

Un réseau de surveillance mondial

En surveillant les micro-organismes chez les animaux sauvages et les populations exposées à ces animaux, les scientifiques pourraient repérer une maladie infectieuse avant qu'elle ne se répande. De fait, l'auteur vient de créer le *Global viral forecasting initiative* – réseau global de prévision des infections virales. Ce réseau est constitué de 100 scientifiques et responsables de Santé publique (*points rouges et orange*) qui surveillent les agents potentiellement dangereux quand ils passent de l'animal à l'homme. Ce réseau couvre une grande variété d'espèces animales et que les hommes sont en contact avec ces animaux. Le réseau pourrait être étendu à d'autres pays qui présentent une grande biodiversité, tels ceux représentés sur la carte (*points jaunes*).

Karl Ammann



Schaff Van Zuydam AP Photo

Kim Cheng Reuters

Kazuyoshi Nomachi Corbis

peut-être déclencher l'alarme avant qu'une maladie infectieuse n'émerge.

En collaboration avec *google.org* et la Fondation Skoll, nous avons créé le *Global viral forecasting initiative* (GVFI, réseau global de prévision des infections virales), un programme où des épidémiologistes, le personnel de Santé publique et des biologistes du monde entier collaborent pour identifier les agents infectieux là où ils émergent et pour les surveiller quand ils passent des animaux à l'homme et se propagent. Ce programme rassemble le maximum d'informations concernant l'ensemble des pathogènes – virus, bactéries, les parasites – qui passent des animaux à l'homme.

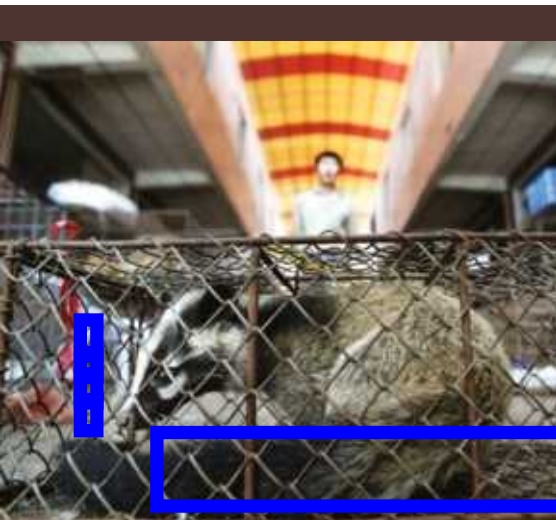
Bien que ces travaux soient récents, notre programme dispose d'une centaine de scientifiques qui suivent des populations ou des animaux sentinelles au Cameroun, en Chine, en République démocratique du Congo, au Laos, à Madagascar et en Malaisie, c'est-à-dire dans toutes les régions favorables à l'émergence de maladies infectieuses (*voir l'encadré ci-dessus*). On surveille des chasseurs, mais aussi d'autres personnes présentant un risque important de contracter des maladies à partir de la faune, tels les vendeurs sur les marchés en Asie où sont présents des animaux vivants.

Toutefois, la découverte d'un nouveau micro-organisme chez un chasseur n'est

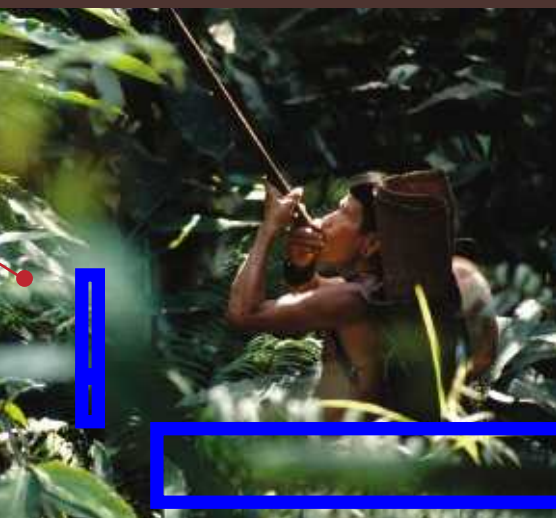
qu'une première étape. Nous devons ensuite déterminer si ce pathogène engendre une maladie, s'il est transmissible d'homme à homme, et s'il a été détecté dans des villes où la densité élevée des habitants favorise sa propagation. L'apparition d'un pathogène dans un centre urbain loin de sa source, serait un signe inquiétant.

Le sang contaminé

Dans le cas des virus HTLV-3 et HTLV-4, nous vérifions régulièrement si ces virus se retrouvent dans les populations à risque des villes proches des endroits où émergent



- Pays : Chine
- Virus déjà observés : SRAS, H5N1
- Population étudiée : les commerçants sur les marchés.



- Pays : Malaisie
- Virus déjà observé : le virus Nipah
- Population étudiée : les chasseurs d'animaux sauvages.

gent la plupart des maladies infectieuses. Les populations à risque sont par exemple les personnes souffrant de drépanocytose – une maladie héréditaire caractérisée par l'altération de l'hémoglobine, la protéine de transport de l'oxygène dans le sang – qui reçoivent des transfusions sanguines pour traiter leur maladie.

Si nous découvrons des individus infectés dans ces populations, nous devons lancer un programme mondial de surveillance des approvisionnements en sang. En fait, nous tentons de mettre au point de nouveaux tests diagnostiques qui permettent de vérifier la présence de ces virus dans le sang.

Il serait aussi utile de déterminer le mode de transmission d'un agent pathogène : nous saurions alors quelles tactiques adopter pour bloquer sa propagation. Par exemple, si un virus est sexuellement transmissible, les responsables de santé publique pourraient lancer des campagnes d'information recommandant l'utilisation du préservatif.

Les gouvernements peuvent aussi prendre certaines mesures pour éviter que le sang conservé dans les banques ne soit contaminé par de nouveaux virus. Par exemple, après nos découvertes concernant la relation entre l'exposition à des primates non humains et l'apparition de nouveaux virus, le gouvernement canadien a modifié sa politique de don du sang : celle-ci exclut désormais les donneurs ayant eu des contacts avec des primates non humains.

C'est l'affaire de tous

En plus de nos tentatives de prévention, des programmes informatiques tels que *HealthMap* et *Promed* compilent des rapports quotidiens sur les épidémies dans le monde entier, et des systèmes d'alerte sur internet, tels que ceux pilotés par google.org, utilisent l'ensemble des données pour prévoir les épidémies de grippe.

De même, on a montré que les systèmes de surveillance des pays concernés et de l'Organisation mondiale de la santé jouent un rôle majeur pour stopper la prochaine épidémie de peste.

Pour notre part, nous aimerions étendre notre réseau de surveillance à d'autres pays, tels le Brésil et l'Indonésie, qui présentent une grande diversité d'espèces animales. Si notre programme réussit, prévenir ne serait ce qu'une seule pandémie dans les 50 prochaines années, le coût net sera minime comparé aux bénéfices humains et financiers.

Les hommes essaient de prédire diverses menaces naturelles, tels les ouragans, les tsunamis, les tremblements de terre et les éruptions volcaniques. Nous n'avons aucune raison de croire que prévoir les pandémies est plus difficile. Étant donné les sommes d'argent colossales nécessaires pour stopper une pandémie, les dégâts humains qu'elle engendre, et les conséquences néfastes qu'elle a sur l'économie, il est préférable de la stopper dès son apparition, et ce à moindre coût. Le principe de prévention n'a jamais été plus judicieux. ■

Une transmission à double sens



✓ **Non seulement les pathogènes passent de l'animal à l'homme, mais ils peuvent aussi circuler dans l'autre sens. Les maladies infectieuses que l'homme transmet à l'animal sont par exemple la tuberculose (le bétail est concerné), la fièvre jaune (les singes d'Amérique du Sud), la rougeole (les gorilles) et la poliomyélite (les chimpanzés).**

✓ BIBLIOGRAPHIE

N. Wolfe et al., *Origin of new human infectious diseases*, *Nature*, vol. 447, pp. 279-283, mai 2007.

N. Wolfe et al., *Bushmeat hunting, deforestation, and prediction of zoonotic disease emergence*, *Emerging Infectious Diseases*, vol. 11, pp. 1822-1827, décembre 2005.

N. Wolfe et al., *Emergence of unique primate T-lymphotropic viruses among central african bushmeat hunters*, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 102, pp. 7994-7999, mai 2005.

N. Wolfe et al., *Naturally acquired simian retrovirus infections in central african hunters*, *Lancet*, vol. 363, pp. 932-937, mars 2004.

✓ SUR LE WEB

Le site du programme *Global viral forecasting initiative* : www.gvfi.org.



La propulsion des nanorobots

Thomas Mallouk et Ayusman Sen

L'ESSENTIEL

- ✓ En s'inspirant des moteurs biologiques à l'œuvre dans les cellules, les chimistes mettent au point des machines microscopiques propulsées par des réactions catalytiques.
- ✓ À cette échelle, les nanorobots doivent lutter contre des lois physiques capricieuses : les fluides paraissent aussi visqueux que du miel et l'agitation moléculaire rend les trajectoires chaotiques.
- ✓ Ces nanorobots motorisés pourraient à terme administrer des médicaments, assembler d'autres machines, ou effectuer des opérations de microchirurgie.

Des moteurs catalytiques qui utilisent le fluide environnant comme combustible propulsent aujourd'hui des robots microscopiques. Ils ouvrent la voie à de nombreuses applications.

Imaginez des bioteleopérateurs ou des arcs à souder aussi petits que des bactéries. De minuscules outils robotisés injectés dans le corps, pourraient localiser et neutraliser les sources de maladie, par exemple les plaques dans les artères ou les dépôts de protéines associés à la maladie d'Alzheimer. Ces nanomachines – des robots à l'échelle du nanomètre – pourraient aussi pénétrer dans les pores des ponts ou les ailes des avions pour y réparer d'invisibles fissures avant qu'elles ne s'aggravent et provoquent des catastrophes.

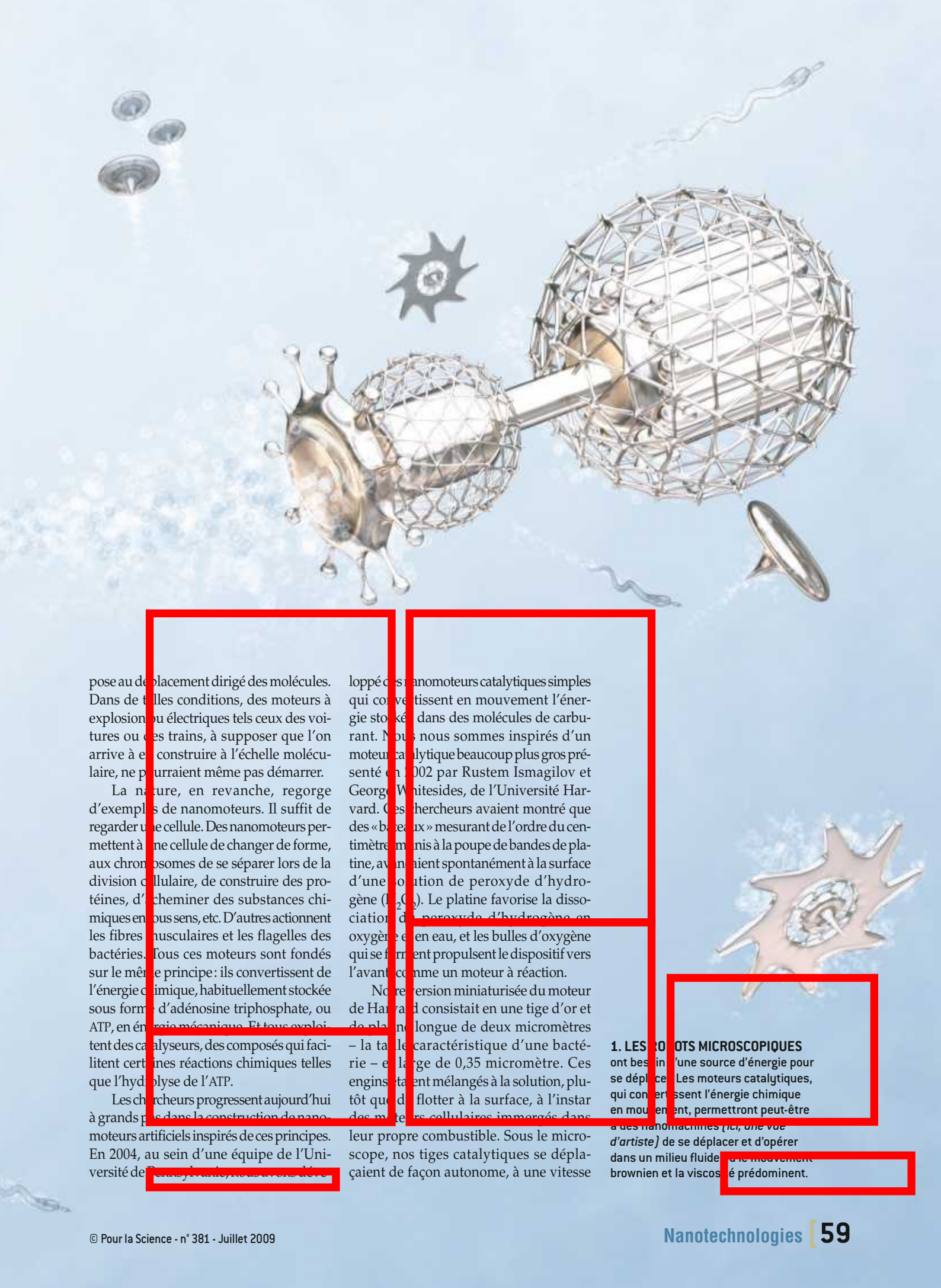
Ces dernières années, les chercheurs ont créé tout un ensemble de remarquables structures à l'échelle moléculaire, qui pourraient devenir les composants de ces

minuscules machines. Une voiture moléculaire dotée de quatre fullerènes (des molécules de carbone en forme de ballon de football) en guise de roues, 5 000 fois plus petites qu'une cellule humaine, a ainsi été mise au point.

Mais sous le capot de cette nanoviture, pas la trace de moteur. Elle ne se déplace qu'au gré des collisions aléatoires avec les molécules du milieu environnant, un processus connu sous le nom de mouvement brownien. C'est actuellement le plus grand problème des nanomachines : nous savons les construire, mais pas comment les faire se déplacer.

À l'échelle d'une cellule ou au-dessous, le déplacement pose des défis spécifiques. L'air et l'eau paraissent aussi épais que de la mélasse, et le mouvement brownien s'op-





pose au déplacement dirigé des molécules. Dans de telles conditions, des moteurs à explosion ou électriques tels ceux des voitures ou des trains, à supposer que l'on arrive à en construire à l'échelle moléculaire, ne pourraient même pas démarrer.

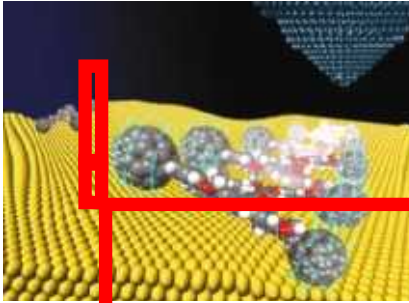
La nature, en revanche, regorge d'exemples de nanomoteurs. Il suffit de regarder une cellule. Des nanomoteurs permettent à une cellule de changer de forme, aux chromosomes de se séparer lors de la division cellulaire, de construire des protéines, d'cheminer des substances chimiques en tous sens, etc. D'autres actionnent les fibres musculaires et les flagelles des bactéries. Tous ces moteurs sont fondés sur le même principe : ils convertissent de l'énergie chimique, habituellement stockée sous forme d'adénosine triphosphate, ou ATP, en énergie mécanique. Et tous exploitent des catalyseurs, des composés qui facilitent certaines réactions chimiques telles que l'hydrolyse de l'ATP.

Les chercheurs progressent aujourd'hui à grands pas dans la construction de nanomoteurs artificiels inspirés de ces principes. En 2004, au sein d'une équipe de l'Université de Pennsylvanie, nous avons déve-

loppé des nanomoteurs catalytiques simples qui convertissent en mouvement l'énergie stockée dans des molécules de carburant. Nous nous sommes inspirés d'un moteur catalytique beaucoup plus gros présenté en 2002 par Rustem Ismagilov et George Whitesides, de l'Université Harvard. Ces chercheurs avaient montré que des « bateaux » mesurant de l'ordre du centimètre munis à la poupe de bandes de platine, avaient spontanément la surface d'une solution de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Le platine favorise la dissociation du peroxyde d'hydrogène en oxygène et en eau, et les bulles d'oxygène qui se forment propulsent le dispositif vers l'avant comme un moteur à réaction.

Notre version miniaturisée du moteur de Harvard consistait en une tige d'or et de platine longue de deux micromètres – la taille caractéristique d'une bactérie – et large de 0,35 micromètre. Ces engins étaient mélangés à la solution, plutôt que de flotter à la surface, à l'instar des moteurs cellulaires immergés dans leur propre combustible. Sous le microscope, nos tiges catalytiques se déplaçaient de façon autonome, à une vitesse

1. LES ROBOTIS MICROSCOPIQUES ont besoin d'une source d'énergie pour se déplacer. Les moteurs catalytiques, qui convertissent l'énergie chimique en mouvement, permettront peut-être à des nanomachines (ici, une vue d'artiste) de se déplacer et d'opérer dans un milieu fluide où le mouvement brownien et la viscosité prédominent.



2. LA NANOVOITURE est un exemple parmi d'autres de machine moléculaire articulée. Elle comporte des essieux à base de carbone et des roues formées de fullerènes (des molécules de carbone en forme de ballon de football). Mais pour l'instant, il lui manque un moteur, si bien qu'elle ne peut qu'avancer et reculer aléatoirement au gré du relief et de l'agitation thermique.

de quelques dizaines de micromètres par seconde, et ressemblaient étonnamment à des bactéries en train de nager.

Pourtant, comme souvent en science, l'hypothèse qui avait motivé cette expérience était fautive. Nous avons imaginé que de minuscules bulles étaient éjectées à l'arrière des nanotiges et les propulsaient. Le comportement réel de nos nanoboteux est cependant tout autre, ce qui nous rappelle qu'à très petite échelle il faut bien souvent penser différemment de façon radicalement différente que dans le monde usuel.

L'inertie vaincue par la viscosité

À l'échelle macroscopique, la notion d'inertie a un sens. Lorsqu'un rameur pousse l'eau vers l'arrière avec ses avirons, la force de réaction le pousse les rames, et par extension le bateau, vers l'avant. Lorsque la poussée cesse, le bateau continue de glisser sur l'eau jusqu'au prochain coup de

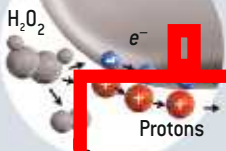
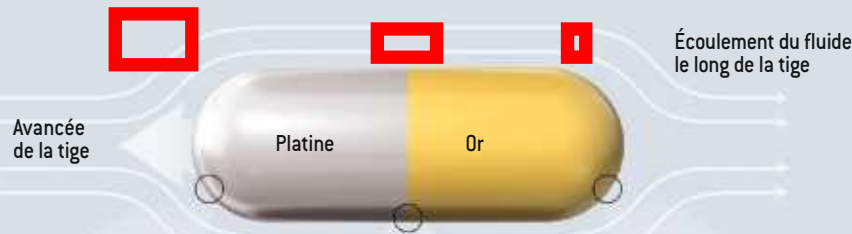
rame. La distance sur laquelle un objet continue de se déplacer après une poussée donnée est déterminée par son inertie, c'est-à-dire sa résistance face aux changements de sa vitesse, mais aussi par la force de traînée engendrée par la viscosité du milieu.

La force de traînée d'un objet est proportionnelle à sa largeur, tandis que son inertie est proportionnelle à sa masse, qui varie elle-même comme sa largeur au cube. En conséquence, si l'on considère des échelles de plus en plus petites, l'inertie des objets diminue beaucoup plus rapidement que leur force de traînée, au point de devenir négligeable devant celle-ci. À l'échelle du micromètre, tout déplacement inertiel est ainsi stoppé par la traînée en moins d'une microseconde, après un centième de nanomètre à peine. Pour un objet de taille micrométrique, se déplacer dans l'eau est aussi dur que pour nous nager dans du miel ! Un nanodispositif n'a quasiment aucune inertie, et les systèmes de propulsion moléculaire, tel le bateau cata-

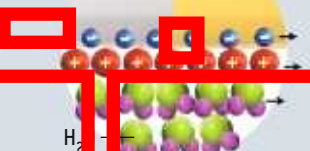
ANATOMIE D'UN MOTEUR CATALYTIQUE

Les nanomoteurs créés par les auteurs sont des tiges d'or et de platine longues de deux micromètres. Ils sont propulsés par la dissociation du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) présent dans l'eau. Cette réaction chimique induit un flux de protons le long de la tige, lesquels entraînent des molécules

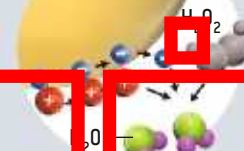
d'eau, propulsant la tige dans la direction opposée. Grâce à ce flux continu, la tige surmonte la viscosité de l'eau. Ce type de moteur permettrait à des robots de la taille d'une bactérie de nager dans le corps humain, ou mettrait en mouvement de minuscules composants, tels des rotors (ci-dessous).



1 Libération de protons
Le platine favorise la dissociation des molécules H_2O_2 en électrons (e^-), en protons et en O_2 . Des protons sont produits en continu.



2 Les protons entraînent l'eau
Des électrons circulent dans la tige jusqu'à la partie en or, tandis que les protons glissent à la surface. Leur charge positive attire les molécules d'eau, qui sont entraînées le long de la tige.



3 Capture des protons
La surface en or catalyse la formation d'eau (H_2O) à partir des protons et des électrons recyclés et des molécules H_2O_2 .



Un rotor
Le même couple de réactions chimiques met en mouvement l'eau autour des dents de cette roue de 100 micromètres de diamètre et la fait tourner.

lytique de R. Ismagilov et G. Whitesides propulsé par des bulles qui s'échappent ponctuellement, sont sans espoir.

Pourtant, il est manifeste que nos nanotiges se déplacent. Pourquoi ? Parce que la propulsion n'est pas inertielle : une force engendrée de façon continue parvient à dominer la traînée. À l'extrémité en platine d'un tige, chaque molécule de peroxyde d'hydrogène se dissocie en une molécule d'oxygène (O_2), deux électrons et deux protons. À l'extrémité en or, les électrons et les protons se combinent avec chaque molécule de peroxyde d'hydrogène pour produire deux molécules d'eau. Ces réactions créent un excédent de protons à une extrémité de la tige et une pénurie à l'autre ; en conséquence, les protons se déplacent du platine jusqu'à l'or le long de la tige.

Or les protons attirent les régions négativement chargées des molécules d'eau. Ils entraînent ainsi ces molécules avec eux dans leur déplacement, ce qui, en réaction, propulse la tige dans la direction opposée.

Une fois ce principe établi, plusieurs autres concepts de moteurs catalytiques ont été élaborés. Les équipes d'Adam Heller, à l'Université du Texas à Austin, et de Joseph Wang, à l'Université de l'Arizona, ont par la suite montré que des mélanges de différents combustibles (glucose et oxygène ou peroxyde d'hydrogène et hydrazine) étaient plus efficaces qu'un combustible unique pour faire fonctionner ces nanomoteurs.

Garder le cap malgré l'agitation moléculaire

Sur le même principe, en inversant le point de vue, on peut induire un écoulement dans un fluide en y plongeant une surface métallique catalytique fixe : le fluide se met alors en mouvement à l'interface entre le solide et le fluide. Nous avons mis en évidence cet effet de pompage sur une surface d'or avec des motifs en argent plongée dans du peroxyde d'hydrogène.

Une des limitations de nos premières nanotiges était le mouvement brownien : les impacts des molécules environnantes leur faisaient subir sans répit des changements de direction aléatoires. Pour envisager une application quelconque, un mécanisme de pilotage était clairement nécessaire.

Notre première tentative pour résoudre ce problème s'appuyait sur un contrôle

NAVIGATION À LA BOUSSE

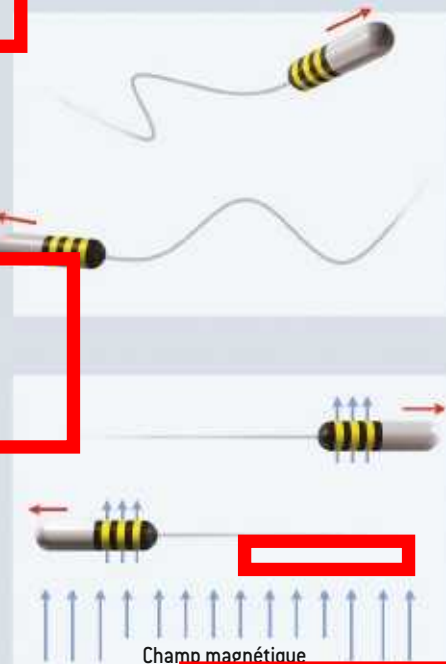
Propulser les nanorobots n'est que la moitié du problème. Un autre défi est de stabiliser leur trajectoire et de pouvoir les diriger. Des aimants intégrés dans les nanotiges, avec un axe Nord-Sud perpendiculaire à la longueur de la tige, permettent un pilotage à distance par l'application d'un champ magnétique.

Nanotiges non contrôlées

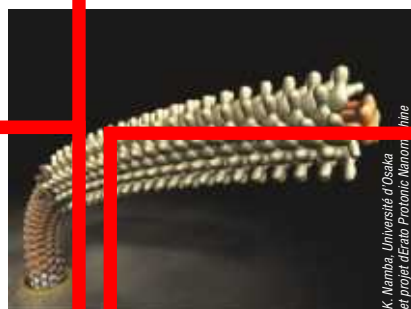
En l'absence de champ magnétique, l'agitation moléculaire rend les trajectoires aléatoires.

Pilotage magnétique

En présence d'un champ magnétique, les tiges s'orientent perpendiculairement au champ. Elles se déplacent alors selon une seule direction, dans un sens ou dans l'autre.



Don F.



3. NANOPROPULSION BIOLOGIQUE : des bactéries telles qu'*Escherichia coli* utilisent des moteurs moléculaires pour faire tourner des filaments nommés flagelles (ci-dessus, un modèle de flagelle sur un armateur). Dans l'environnement liquide d'une bactérie, la viscosité domine l'inertie ; si le flagelle s'arrête de tourner, la bactérie s'arrête immédiatement.

magnétique. Nous avons inséré dans les tiges des disques de nickel aimantés, l'axe des pôles étant dirigé perpendiculairement à la longueur des tiges. Un aimant situé à quelques millimètres exerce un couple suffisant sur la tige pour la maintenir alignée selon une direction et vaincre la tendance de l'agitation moléculaire à faire tourner la tige dans tous les sens. La seule force résultante est celle de l'action catalytique, qui s'exerce selon la longueur de la tige. Nos nanotiges se déplacent ainsi en ligne droite et peuvent être pilotés en jouant sur l'orientation de l'aimant.

Enfin, dernière, Vincent Crespi, de l'Université de Pennsylvanie, et l'un d'entre nous (A. Sen) ont montré que des nanomoteurs pilotés magnétiquement peuvent tracter des conteneurs (des billes de plastique) environ dix fois plus gros qu'eux dans un fluide. On peut envisager de nombreuses applications intéressantes pour ces robots à pilotage externe. Ils pourraient par exemple délivrer des médicaments dans des cellules particulières du corps, ou acheminer des molécules le long d'un réseau de transport nanoscopique.

UN GRADIENT CHIMIQUE ou de la lumière permettent d'orienter les déplacements des nanomachines.

Pour d'autres applications, il sera toutefois essentiel que les nanorobots soient capables de se déplacer de façon autonome. Nous avons récemment découvert que nos nanomoteurs catalytiques peuvent suivre des chemins dits chimiotactiques, analogues au trajet semé de miettes de pain du Petit Poucet ou, plus prosaïquement, analogues à ceux que suivent parfois les bactéries.

Une bactérie se déplace normalement par une série de petits trajets en ligne droite, entrecoupée de virages aléatoires. Mais lorsqu'une portion de ligne droite coïncide avec un gradient chimique, par exemple une concentration de nutriments qui croît dans la direction de leur source, la bactérie augmente un peu la longueur de son trajet rectiligne. Les trajets favorables durent plus longtemps que ceux qui vont dans des directions

défavorables, la bactérie, au gré de son déplacement erratique, finit par converger sur sa cible, même si elle ne peut pas se diriger directement. On parle alors de chimiotaxie.

La course vers la lumière

De façon similaire, nos nanomoteurs se déplacent plus vite quand le combustible est plus concentré. Les portions de trajet de leur mouvement brownien dirigées vers une source de combustible (par exemple une bobine de gel imbibée de peroxyde d'hydrogène) sont ainsi allongées entre deux changements de cap et, en moyenne, les nanomoteurs se rapprochent de la source.

Plus récemment, nous avons mis au point des nanodispositifs mus et dirigés par la lumière (phototaxie). Ils exploitent la lumière pour casser des molécules en ions positifs et négatifs. Ces deux types d'ions diffusent à des vitesses différentes, ce qui crée un champ électrique, lequel met en mouvement les particules. Selon la nature des ions libérés et la charge des nanodispositifs, ceux-ci sont attirés vers la lumière ou au contraire, vers l'ombre.

Une utilisation étonnante de cette technique est un système activé par la lumière où certaines particules se comportent comme des prédateurs et d'autres comme des proies : les particules d'un type cèdent des ions qui attirent les particules de l'autre type vers elles. Le mouvement d'ensemble de ces particules ressemble à celui des globules blancs, les phagocytes, qui « pourchassent » une bactérie.

Le déplacement de nanodispositifs par chimiotaxie ou phototaxie n'est encore au stade préliminaire, mais cela pourrait aboutir à la conception de nanorobots autonomes « intelligents », qui se déplaceraient vers leur cible en exploitant des combustibles abondants dans l'organisme ou dans l'environnement. Ces travaux ouvrent aussi la voie à la conception de robots qui communiqueraient chimiquement les uns avec les autres et seraient à même d'accomplir des tâches collectives, par exemple se déplacer en groupes ou former des motifs.

En outre, les dispositifs qui présentent des comportements collectifs soient inanimés, leur mouvement est régi par les mêmes processus physiques que celui des micro-organismes vivants dont ils sont inspirés. Cette analogie offre en retour un

Le moteur électrostatique moléculaire

Mettre au point des propulseurs, comme les auteurs de cet article s'y attachent, est un objectif important en nanosciences. Réussir à maîtriser la rotation de moteurs moléculaires à l'échelle du nanomètre et de la molécule unique en est un autre. Cela conduira à la conception de dispositifs électromécaniques de plus en plus petits et économiques en énergie.

Un moteur moléculaire nanométrique est une machine qui transforme de façon continue une énergie pour produire un travail via un mouvement de rotation unidirectionnel contrôlé. Ce mouvement doit être réversible et sa fréquence suffisamment grande pour qu'il soit mesurable et exploitable.

Les moteurs que nous avons synthétisés comportent une partie fixe (le stator, en bleu) greffée par une liaison covalente à une surface fixe, et une partie mobile (le rotor, en rouge), qui porte des cinq groupes fonctionnels chargés.

à cette molécule un caractère organométallique. Les électrodes servant de réservoirs d'électrons (en jaune) sont connectés aux moteurs.

En présence d'un potentiel de rence de potentiel, l'électrode positive injecte à la partie mobile de la molécule des



Le moteur électrostatique moléculaire mesure que deux à quatre nanomètres de diamètre.

charges de même signe. La force électrostatique qui s'ensuit, dans un sens privilégié, entraîne un mouvement de rotation. Il s'agit donc d'un moteur électrostatique, fonctionnant au principe décrit par Benjamin Franklin dès 1748... à l'échelle du nanomètre. La disposition asymétrique des électrodes permet de contrôler le sens de rotation.

Enfin, pour une application générale, nous avons synthétisé plusieurs molécules de

de diamètre et de constitutions différentes, qui illustrent les contraintes à respecter. Le système doit tout d'abord être le plus rigide possible, c'est-à-dire résister à des angles de rotation inutiles, qui entraîneraient une trop grande variété de géométries. Il faut ensuite que la rotation autour de l'axe

qu'il y ait des risques de dissociation de la partie fixe et de la partie mobile.

Plusieurs collaborations internationales sont maintenant mises en œuvre pour étudier cette rotation électro-induite. À plus long terme, ces moteurs pourraient intégrer des robots nanométriques capables de remplir des fonctions variées, allant de la médecine à la vie de tous les jours.

raient motoriser les nanovéhicules que nous développons par ailleurs.

Jean-Pierre Launay
et Wéaël Rapenne

Université Paul Sabatier
de Toulouse - Centre
d'élaboration de matériaux
et d'études structurales
(CEMES-CNRS)



4. SUIVRE LES RESSOURCES est une bonne façon de se diriger. Les nanotiges catalytiques se déplacent par poussées aléatoires, mais la poussée est d'autant plus longue que la concen-

tration de combustible est élevée. En conséquence, les nanorobots se déplacent en remontant le gradient chimique du combustible, à l'instar des bactéries qui suivent la nourriture

(on parle de chimiotaxie). On voit ici les nanotiges s'agglutiner spontanément autour d'une goutte de gel imprégné de peroxyde d'hydrogène (en haut à gauche de chaque image).

éclairage sur le fonctionnement des différents composants des systèmes vivants.

Nous avons par exemple découvert en étudiant les nanomoteurs catalytiques que la vitesse de croisière théorique d'un nanomoteur doit être proportionnelle à sa taille. Cette loi d'échelle découle du fait que la force de traînée est proportionnelle à la taille de l'objet, et que le rendement de la réaction catalytique est proportionnel à sa surface, elle-même proportionnelle au carré de la taille.

Les limites physiques du nanomonde

Le biologiste James Marden, de l'Université de Pennsylvanie, a trouvé une loi d'échelle plus générale qui relie la masse d'un moteur à la force maximale qu'il peut exercer. Selon cette loi, valable des moteurs moléculaires jusqu'aux réacteurs d'avion, les moteurs plus petits sont toujours moins puissants. En particulier, tout en bas de l'échelle, vers 50 à 100 nanomètres, toute force propulsive développée par un nanomoteur catalytique ne peut plus surpasser l'agitation moléculaire. Cela implique que les bactéries de la taille du micromètre sont les plus petits nageurs libres de la biologie. Aux échelles plus petites, le mouvement brownien empêche de conserver une trajectoire stable dans un fluide. De fait, dans la nature, tous les moteurs à échelle moléculaire, y compris les protéines musculaires et les enzymes qui produisent l'ATP, sont soit contraints de se déplacer le long d'un chemin, soit enchâssés dans une membrane. Il en sera nécessairement de même avec les futurs nanorobots.

Pour les moteurs à échelle moléculaire, la propulsion catalytique mise en évidence dans nos nanotiges peut être utilisée

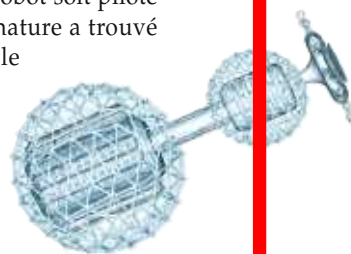
pour dominer le mouvement brownien, que le robot soit piloté ou non. Cependant, la nature a trouvé des moyens de mettre le mouvement brownien à contribution plutôt que de lutter contre lui. De nombreux moteurs biologiques sont fondés sur le principe du « cliquet » :

L'énergie d'une réaction catalytique sert non pas à créer un mouvement dans une certaine direction, mais à permettre aux impacts des molécules d'être convertis en mouvement s'ils s'exercent dans la bonne direction, et d'être contrebalancés s'ils poussent dans la direction contraire. Ces dernières années, des expériences sur les premiers « cliquets browniens » artificiels ont débuté (voir l'encadré page 64).

Oren Regev, de l'Université de Caroline du Nord, et ses collègues ont présenté une autre approche de la propulsion et du pilotage. Ils ont récemment montré que l'on peut propulser des objets dans du liquide sans aucun combustible. Leurs submersibles contiennent une diode, dispositif qui permet au courant électrique de passer dans un sens mais pas dans l'autre.

Quand on applique un champ électrique alternatif dans le voisinage d'un tel dispositif, la diode le convertit en champ statique, qui pointe dans une direction constante et produit une force nette par interaction des charges, donc une poussée. On sait fabriquer des diodes en circuits intégrés bien plus petits qu'un micromètre, et l'on a synthétisé des diodes moléculaires de deux ou trois nanomètres de long seulement.

Comme ils sont alimentés de façon externe, les moteurs à diode suivent des lois d'échelle différentes des moteurs



LES AUTEURS



Ayusman SEN est professeur de chimie à l'Université d'État de Pennsylvanie, aux États-Unis.

Thomas MALLOUK est professeur de physique et chimie des matériaux dans la même université.

✓ SUR LE WEB

Le groupe de recherche en nano-ingénierie de l'Université d'État de Pennsylvanie : <http://research.chem.psu.edu/axsgroup/research.html>



Les nanonageurs en vidéo sur <http://www.pourlascience.fr/eweb/pages/v/video.php>

LE CLIQUET BROWNIEN

En raison de l'agitation thermique, un nanodispositif immergé dans un fluide est soumis à des impacts moléculaires incessants et aléatoires. D'où une trajectoire erratique, le mouvement brownien. Des chimistes ont mis au point des machines moléculaires qui exploitent ce phénomène : les cliquets browniens. Ainsi, l'équipe de David

Leigh, de l'Université d'Édimbourg, développe un système de moteur à rail qui transforme des déplacements aléatoires en mouvement directionnel (ci-dessous). Cela semble à première vue violer le deuxième principe de la thermodynamique, mais tout tri parmi les mouvements browniens consomme lui-même de l'énergie.

❶ Le dispositif se déplace aléatoirement

Un « nano-robot » se déplace aléatoirement dans un monde d'un monde immergé dans un liquide. Sans moteur, il saute aléatoirement en avant ou en arrière chaque fois qu'il subit un impact assez fort de la part d'une molécule de liquide.

❷ Des barrières entrent en jeu

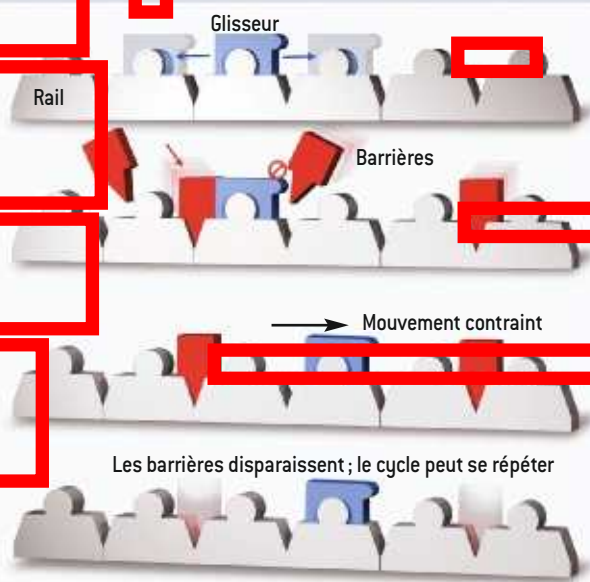
Les molécules du liquide agissent comme des barrières, alors comme des barrages pour le glisseur. Celui-ci est toutefois, par construction, asymétrique, de sorte qu'il empêche les barrières de se fixer directement devant lui.

❸ Le mouvement devient unidirectionnel

Dès lors, quand une molécule heurte le véhicule, le barrage l'empêche de reculer. Les obstacles augmentent ainsi les chances du véhicule d'avancer d'un pas dans un sens plutôt que dans l'autre.

❹ L'ardoise est effacée

Les barrières se rompent de temps en temps, si bien que le glisseur peut continuer à avancer. Une telle rupture consomme irréversiblement de l'énergie, comme le requiert la deuxième loi de la thermodynamique.



Donkey

catalytiques. O. Velev a démontré qu'entre les échelles du centimètre et du millimètre, la vitesse d'un moteur à diode ne varie pas avec sa taille, ce qui est en accord avec la théorie. Cela suggère que de tels moteurs pourraient être assez puissants. À l'échelle de quelques dizaines de micromètres, l'ordre de grandeur d'une cellule humaine.

Feynman visionnaire

On peut aussi imaginer des scalpels microscopiques comportant des composants de propulsion, de pilotage et de détection imprimés sur de minuscules puces de silicium, et dirigés à distance à l'aide de champs électriques de radiofréquence, qui ne sont pas absorbés par les tissus corporels. Ces microscalpels pourraient être délivrés dans la zone souhaitée avec une très fine aiguille, puis télécommandés jusqu'à leur destination.

Les scientifiques – et les auteurs de science-fiction – envisagent de telles nanomachines au moins depuis une célèbre conférence du physicien Richard Feynman sur les potentialités du monde nano-

scopique donnée en 1959, qui abordait les limites d'échelle pour les dispositifs mécaniques et les systèmes de stockage de l'information. Il fit remarquer que, les lois de la physique classique étant valables jusqu'à l'échelle des molécules, il n'y avait pas de raison théorique qui interdise de réaliser des engins à partir de composants moléculaires.

La conférence de Feynman inspire encore aujourd'hui le développement de machines à l'échelle moléculaire. Depuis, la représentation de la cellule vivante a évolué, de celle d'un bouillon d'enzyme où se produisent des réactions métaboliques jusqu'à celle d'une montre suisse de précision, constituée de moteurs chimiques bien compartimentés et liés mécaniquement.

Nous avons fait de grands progrès dans la fabrication de nanomoteurs inspirés de la biologie, mais il y a encore beaucoup à apprendre sur la propulsion catalytique à ces échelles. Sans aucun doute, les recherches à venir sauront exploiter ces connaissances en biomédecine, en énergétique, en synthèse chimique et dans bien d'autres domaines.

BIBLIOGRAPHIE

J. Wang, *Can nanomachines compete with nature biomotors ?*, *ACS Nano*, vol. 3, n° 1, pp. 4-9, 27 janvier 2009.

W. F. Paxton *et al.*, *Chemical Locomotion*, *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 45, n° 33, pp. 5420-5429, 19 novembre 2006.

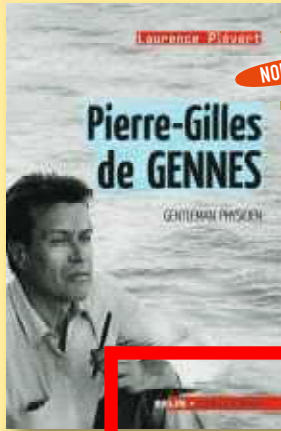
Z. L. Wang, *Les nanogénérateurs*, *Pour la Science*, n° 366, avril 2009.

D. Astumian, *Les moteurs moléculaires*, *Pour la Science*, n° 290, décembre 2001.

La sélection SCIENCE

POUR LA

Des livres scientifiques à la pointe de l'actualité



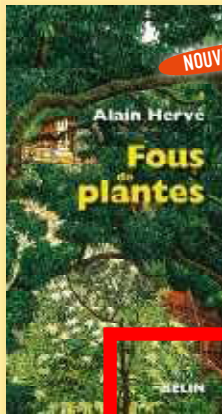
NOUVEAUTÉ

Pierre-Gilles de Gennes

Laurence Plévert

Qui est véritablement Pierre-Gilles de Gennes ? D'où vient l'élégance des théories qu'il a élaborées et son goût pour l'éclectisme scientifique, qui l'a amené de la supraconductivité aux neurosciences en passant par les cristaux liquides et la biologie ? Laurence Plévert, longtemps journaliste à *Pour la Science*, dans la première biographie du prix Nobel de physique qui lui a consacré de longues heures d'entretien.

005228 • 368 pages • 23,00 €



NOUVEAUTÉ

Fous de plantes

Alain Hervé

L'auteur, écrivain et botaniste, raconte avec talent et passion des histoires de plantes, qui consacrent leur vie à leur découverte, à leur culture... Un livre « jubilatoire » écrit le botaniste Francis Hallé dans sa préface.

005123 • 160 pages • 14,50 €



Feuilletez les premières pages de ces livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.editions-belin.com

Actualité

Astronomie

004607	Aux confins du système solaire	23,00 €
004733	Le ciel, PRIX DU LIVRE D'ASTRONOMIE	
	Un jardin vu de la terre	22,50 €
004900	Astronomie des Anciens	25,00 €
004109	Les autres mondes	24,00 €

Biologie / Évolution

004698	Homme et le chimpanzé	17,00 €
004206	La Terre avant les dinosaures	25,00 €
004694	Comment la vie a commencé	19,50 €
004952	La conquête des virus	19,50 €
005119	Darwin, l'homme qui osa !	6,95 €
004951	Les poissons font-ils l'amour ?	19,50 €

Physique

075089	Carnets de voyages relativistes	20,00 €
004552	La physique PRIX ROBERVAL	
	par les objets quotidiens	22,50 €
004751	Sons et lumière	23,00 €
004006	Météorologie	23,00 €
004724	La fusion nucléaire	21,00 €

Nature

004681	Guide des orchidées de France	16,90 €
004674	Guide des Champignons de la montagne	16,90 €
004672	Guide des oiseaux des villes et des jardins	16,90 €
004671	Guide des coquillages de France	16,90 €

Mathématiques

075090	Le pays des paradoxes	24,00 €
004622	Vous avez dit hasard ?	25,00 €
004286	L'inventeur qui comme Ulysse...	17,50 €
004732	Les déchiffreurs	19,50 €

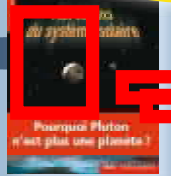
Géologie

004088	Roches et paysages	21,00 €
004723	Que disent les minéraux	23,50 €

Environnement et société

004624	Le petit traité de l'imposture scientifique	18,00 €
004950	OGM, le nouveau Graal ?	17,50 €
004508	Atmosphère, océan et climat	29,00 €

LIVRE D'ASTRONOMIE

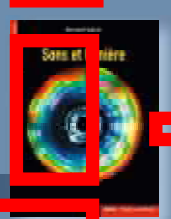


Pourquoi Pluton n'est plus une planète ?

A Dictionnaire de l'astronomie



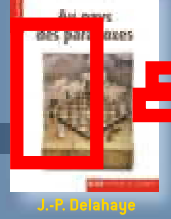
Le son et la lumière



B. Vauclaire



P. Failler, Lesbois P. Pernot



J. P. Delahaye



P. Failler



P. Failler

Mais qu'est-ce qui fait fleurir les plantes ?

François Parcy

De nombreuses plantes ne fleurissent qu'après avoir été soumises à une période de froid et quand le jour a une durée adaptée. Les mécanismes du contrôle de la floraison sont désormais élucidés à l'échelle moléculaire.

L'ESSENTIEL

- ✓ Pour fleurir, la plupart des plantes ont besoin d'une exposition de plusieurs semaines au froid et d'une longueur de jour adaptée.
- ✓ On dispose désormais d'une description précise des mécanismes moléculaires qui font fleurir les plantes.
- ✓ Le froid déclenche la synthèse de protéines qui inhibent un gène clé au sommet de la tige.
- ✓ Dans les feuilles, la lumière active la synthèse d'un flavonoïde, une protéine qui migre dans la sève jusqu'au bouton floral.

Chaque année, les mêmes plantes fleurissent à peu près au même moment. Dans les pays tempérés, les crocus et les primevères s'épanouissent en février-mars, les champs de colza dessinent des damiers jaunes au printemps ; en été, les coquelicots parsèment les champs de taches rouges, et les colchiques marquent l'arrivée de l'automne. Si les plantes à fleurs accompagnent ainsi les saisons, c'est qu'elles sont adaptées à leur environnement : chaque espèce fleurit, donc se reproduit, lors de la période la plus favorable à la dispersion des grains, qui assureront la naissance d'une nouvelle génération.

Cette adaptation sous-entend que les plantes sont capables de capter des signaux de l'environnement spécifiques d'une période de l'année. Ces signaux ont été identifiés à partir des années 1920 : ce sont principalement la température et la durée du jour. Mais les mécanismes moléculaires qui permettent à la plante d'interpréter ces messages environnementaux, et de fleurir ont été découverts récemment. Après avoir rappelé quelques généralités sur la floraison, nous exami-

nerons le rôle essentiel que jouent le froid et la longueur du jour sur l'apparition – ou non – des fleurs.

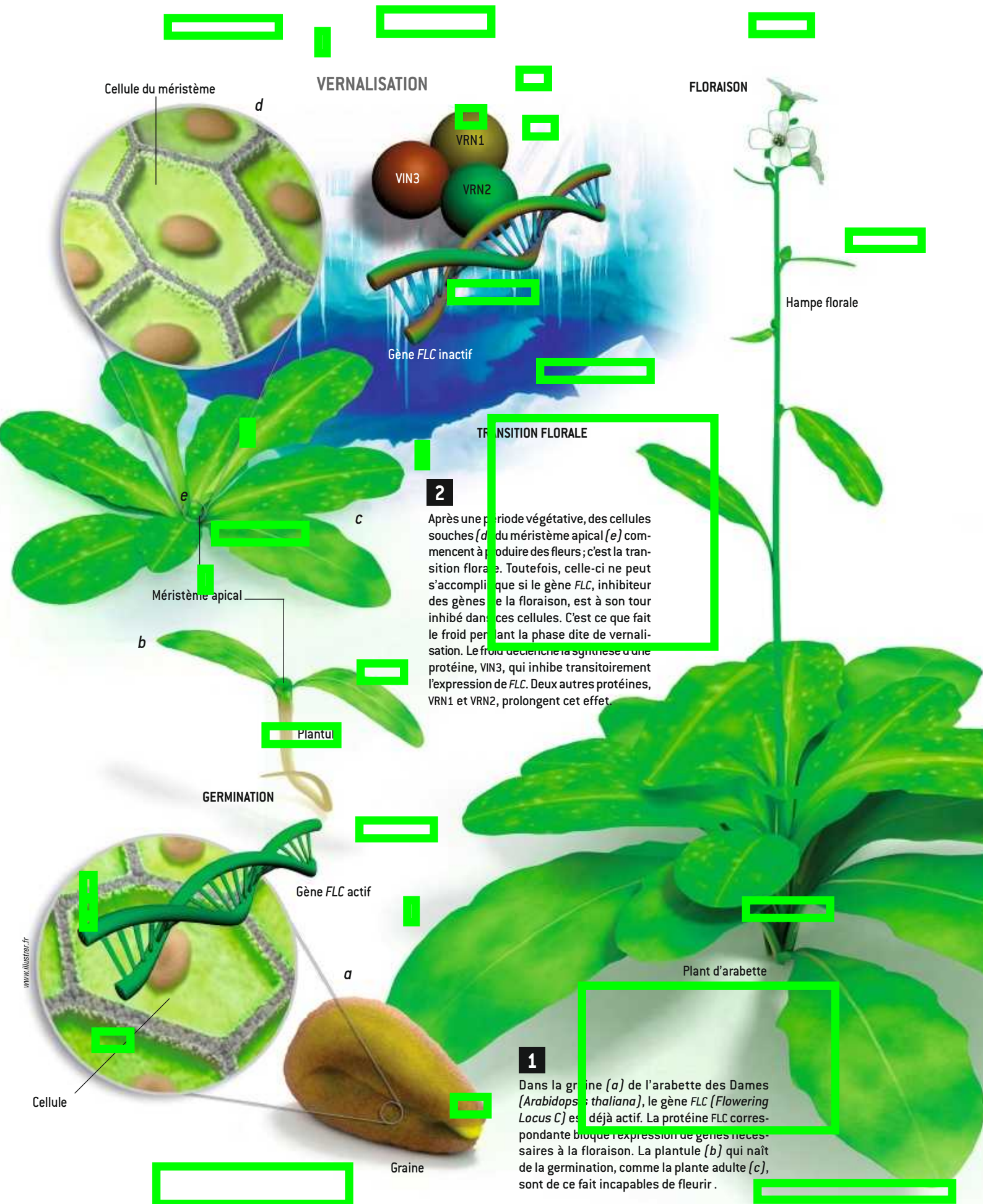
Les plantes à fleurs, ou angiospermes (du grec *angion*, capsule, *sperma*, semence), représentent la majorité des espèces végétales sauvages et cultivées, avec plus de 260 000 espèces connues. Apparu au Jurassique supérieur, il y a 150 millions d'années, ce groupe végétal doit son succès évolutif à la « invention » de la fleur.

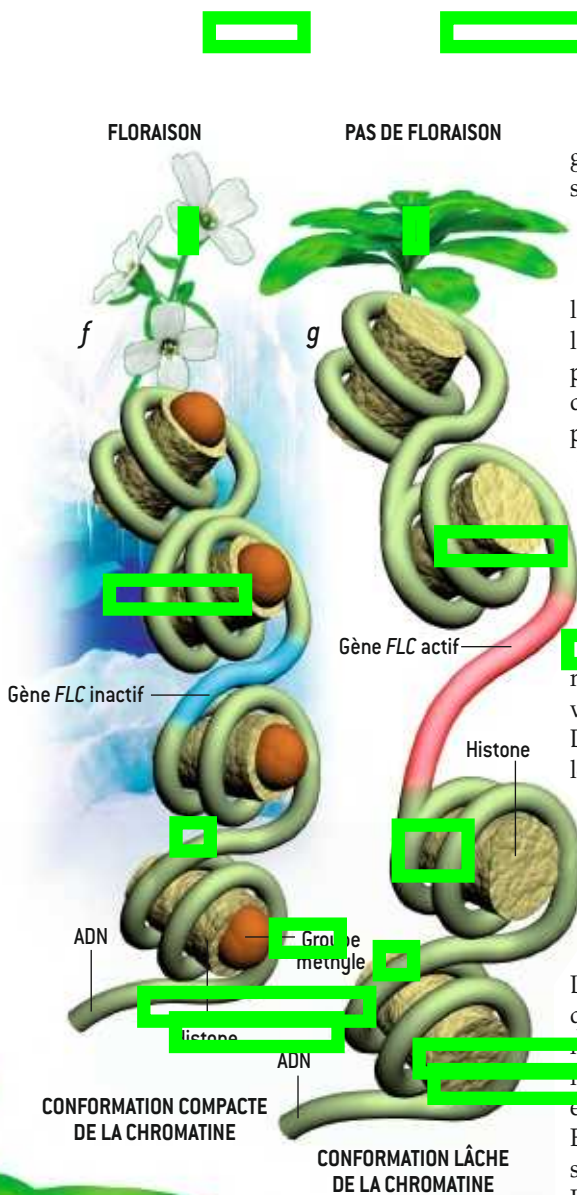
Fleurir au bon moment

Cet organe, constitué de feuilles modifiées, abrite et protège les organes reproducteurs (les étamines, mâles, et les carpelles, femelles), attire les insectes pollinisateurs (par ses parfums, ses couleurs et son nectar) et donne naissance à un fruit, structure adaptée à la survie et à la dispersion des grains qu'il contient. Grâce à leurs fleurs et à leurs fruits, les angiospermes ont colonisé tous les milieux, y compris aquatique, en supplantant les plantes aux graines non protégées et dépourvues de fleurs, les gymnospermes (les conifères par exemple).



© T. Ayrton Photography/Beateworks/Corbis





Toutefois, la structure florale est fragile. Un déclenchement de la floraison qui serait suivi d'une période trop froide ou trop sèche compromettrait à coup sûr la descendance. La floraison doit donc se produire à un moment favorable de l'année. C'est particulièrement vrai pour les plantes dites monocarpiques, qui ne produisent des graines qu'une seule fois dans leur vie, bien qu'elles vivent parfois plusieurs années. Par ailleurs, le croisement entre individus est facilité lorsque la floraison des plantes de la même espèce est synchronisée, surtout pour les nombreuses plantes, dites allogames, qui ne peuvent s'autoféconder.

Les mécanismes de la floraison ont été compris grâce à l'étude de plantes modèles annuelles ou bisannuelles. Leur vie est caractérisée par deux phases. Durant la première, la phase végétative, les parties aériennes produites sont essentiellement des tiges et des feuilles. Elles sont engendrées par des cellules souches rassemblées en une structure, le méristème apical, le bourgeon parfois visible au bout des tiges, parfois caché, comme au cœur d'une salade. La phase végétative peut durer de quelques jours à quelques mois. Puis ce méristème commence à produire des fleurs ; c'est la transition florale. La plante entre alors en phase reproductive. Elle mourra lorsqu'une grande partie de ses fleurs auront donné des graines. L'exemple type de ces plantes modèles est l'arabette des Dames, *Arabidopsis thaliana* (voir l'encadré page 70).

En fonction des conditions de l'environnement, une même plante annuelle ou bisannuelle peut fleurir au bout de quelques semaines ou de plusieurs mois. Sur ce point, les plantes diffèrent fondamentalement de la plupart des animaux, chez lesquels la maturité sexuelle n'est acquise qu'à un certain âge et est beaucoup moins influencée par l'environnement. Toutefois, les plantes présentent souvent, comme les animaux, une période juvénile pendant laquelle elles ne peuvent pas se reproduire, même si les conditions sont favorables.

Deux facteurs clés conditionnent le déclenchement de la floraison. Le premier est l'exposition à une période prolongée de froid ; le second est la durée du jour, ou photopériode. Les comportements varient alors : certaines espèces fleurissent sans période de froid, tels l'endive, l'épinard, le pois ou le blé de printemps ; le plus sou-

vent, elles ont besoin à la fois d'une exposition au froid, puis d'une photopériode adéquate. L'importance de ces deux facteurs pour la reproduction des plantes résulte de leur constance d'une année sur l'autre, contrairement aux facteurs environnementaux sujets à des fluctuations, tels l'ensoleillement et la température ambiante.

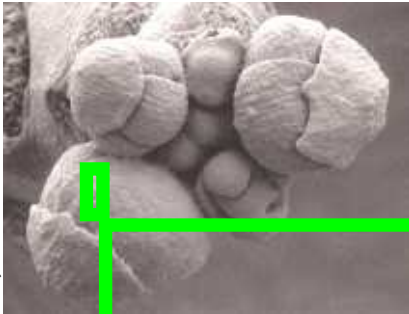
Comment le froid agit-il sur la floraison ? Son importance dans les pays tempérés a été mise en évidence sur le blé aux États-Unis à la fin du XIX^e siècle, puis par l'Allemand Gustav Gassner peu avant 1920. Par exemple, les blés d'hiver sont semés à l'automne et ont besoin, pour fleurir au printemps, de passer la saison froide sous forme de plantules de quelques centimètres de haut. La récolte est souvent abondante à condition que l'hiver ne soit pas trop rude, car les jeunes plants gèleraient. Les blés de printemps, eux, sont semés à la fin de l'hiver : ils ne risquent pas de subir les gelées, mais ont des rendements inférieurs, car leur période de croissance est plus courte que celle des blés d'hiver.

La mémoire de l'hiver

En URSS, à la fin des années 1920, un horticulteur, Trofim Lyssenko, affirma que l'humidité rendait la graine plus sensible à l'action du froid et que des blés d'hiver pouvaient être semés au printemps, ce qui permettrait de ne pas exposer les jeunes plantules aux hivers rigoureux. Le nom qu'il donna à ce traitement fut traduit en français par vernalisation (du latin *vernalis* : printanier). Mais, généralisé à l'ensemble du territoire russe, ce traitement fut un échec. En revanche, l'effet positif du froid sur la floraison a été confirmé par des recherches plus récentes. Il concerne par exemple les plantes bisannuelles, telles la carotte et la betterave sucrière : elles germent et grandissent la première année, accumulent des réserves, passent l'hiver enfouies dans le sol sous forme de tubercules, reprennent leur croissance et fleurissent au cours de leur second printemps, avant de produire des graines et de mourir.

Outre son importance pratique pour l'agriculture, la vernalisation, entendue aujourd'hui comme l'effet du froid prolongé sur la capacité à fleurir, intéresse les scientifiques. Elles ont permis de découvrir, ont, apparemment, une « mémoire » de

La floraison a lieu quand le gène *FLC* est inhibé. Elle ne peut se produire si ce gène s'exprime et si la protéine FLC est présente. C'est l'arrangement de la chromatine, constituée par l'enroulement de l'ADN autour de protéines, les histones, qui est le facteur clé. Les protéines VIN3 et VRN sont responsables des changements de conformation de la chromatine. La première, produite sous l'action du froid, se lie à la chromatine au niveau du gène *FLC*. Là, elle provoque l'addition de groupes méthyle sur certaines histones (f). Cela inhibe temporairement l'expression du gène *FLC*. La plante peut alors fleurir. Inversement, la conformation ouverte de la chromatine (g) empêche l'inhibition de l'expression du gène *FLC*, ce qui empêche la floraison.

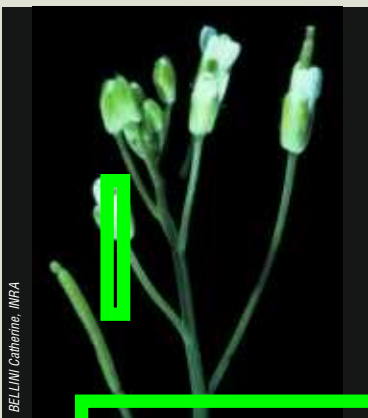


F. Parcy

BOUTONS FLORAUX d'arabette des Dames observés au microscope électronique à balayage. Le méristème apical d'où proviennent les fleurs est au centre. Chaque petite « boule » est un bourgeon floral.

LE MODÈLE ARABETTE

L'arabette des Dames, *Arabidopsis thaliana*, est une petite mauvaise herbe de la famille du colza ou de la moutarde (brassicacées). Son génome (séquencé en 2001) est court, tout comme son cycle de vie (environ six semaines), si bien qu'elle est aujourd'hui la plus utilisée des plantes pour les recherches sur les végétaux ; en outre, elle produit des milliers de graines. Les biologistes manipulent facilement son génome. Connaissant les perturbations provoquées par les mutations, ils identifient les gènes mutés et en réduisent leur fonction normale. Par exemple, chez certaines souches, la floraison est précoce ou, au contraire, tardive, ou qui sont insensibles à la durée du jour ou au froid hivernal.



BELLINI Catherine, INRA

l'hiver. Durant les mois s'écoulant entre le moment où la plante est exposée au froid et celui où elle fleurit, les cellules souches du méristème apical effectuent de multiples divisions. Les cellules qui produisent les fleurs ne sont donc pas celles qui ont connu le froid, mais les descendantes de leurs descendantes. En apparence, les tissus se souviennent de l'exposition au froid que la plante a subi(e) dans le passé. Comment une plante peut-elle avoir de la mémoire ? C'est ce que des découvertes récentes ont révélé.

Les scientifiques ont exploité le fait qu'il existe des arabettes ayant besoin de vernalisation (celles du Nord de l'Europe) et d'autres qui fleurissent sans ce traitement (aux îles du Cap-Vert par exemple). En étudiant les différences entre ces souches, le groupe de Richard Amasino, de l'Université du Wisconsin, a mis en évidence le rôle du gène *FLC* (*Flowering Locus C*, Locus de floraison C). La protéine FLC se lie à l'ADN et bloque la transcription des gènes nécessaires à la floraison. En revanche, le froid fait baisser la quantité de FLC dans les cellules. Ainsi, le froid, en inhibant l'inhibiteur FLC, stimule la floraison.

À l'automne, lorsque la plante n'a pas encore été exposée aux températures hivernales, la quantité de la protéine FLC est importante, ce qui empêche la transition florale. Puis, au cours de l'hiver, les basses températures font décroître sa concentration, jusqu'au moment où la floraison est possible, c'est-à-dire au printemps. L'étude de dizaines de souches d'arabette venant de multiples régions du globe montre que le besoin en vernalisation est toujours lié à l'abondance ou à l'activité de la protéine FLC : les arabettes qui fleurissent sans exposition au froid en produisent peu de façon permanente, ou synthétisent une protéine FLC inactive à cause de mutations présentes soit dans le gène *FLC* lui-même, soit dans un gène activateur de ce dernier, nommé *FRIGIDA*.

Les mutants « mnésiques »

À ce stade on peut se demander comment le froid peut jouer sur la quantité d'une protéine. La question a été étudiée sur des mutants d'arabette qui ne fleurissent pas, même si on les soumet au froid : insensibles à la vernalisation, ils continuent à produire des feuilles alors que les plantes non mutantes ont déjà fleuri. Les équipes

de Carolin Dean, à Norwich, au Royaume-Uni, et de Richard Amasino ont découvert que les mutants insensibles se rangent dans deux classes. Dans la première, les basses températures ne font pas baisser la quantité de la protéine FLC ; dans la seconde, elles réduisent bien la quantité de protéine produite, mais de façon transitoire : la protéine reste peu abondante tant que le froid est présent, puis sa concentration croît avec la température. Ces mutants sont en quelque sorte « mnésiques » : ils oublient qu'ils ont eu froid dès qu'il refait chaud.

Les chercheurs ont identifié les défauts moléculaires des deux types de mutants. Chez les mutants de la première classe, un facteur nommé *VIN3* (*Vernalization Insensitive 3*) est en cause. Normalement, *VIN3* agit en empêchant l'expression du gène *FLC*, autrement dit la synthèse de la protéine FLC. Or ce facteur présente la particularité d'être synthétisé sous l'effet du froid, ce qui provoque la baisse de la quantité de FLC et, par suite, la floraison. Mais cela se produit seulement si l'exposition au froid est assez longue, soit plusieurs semaines, un temps nécessaire pour que le facteur *VIN3* s'accumule. Ce mécanisme évite à la plante de fleurir « hors saison », par exemple en septembre après seulement une semaine de froid inhabituel.

Ainsi, le froid n'agit pas directement sur la quantité de la protéine FLC, mais indirectement, *via* la synthèse de la protéine *VIN3*. Comment ? On l'ignore encore. Chez les animaux, le froid agit parfois en modifiant la conformation spatiale des molécules d'ADN ou des protéines, ou en modifiant la fluidité des membranes cellulaires. Mais rien de tel n'a encore été décrit chez les plantes.

Chez les mutants « mnésiques » de la seconde classe, c'est l'anomalie de protéines nommées *VRN1* et *VRN2* qui déclenche la synthèse de la protéine FLC, et donc qui inhibe la floraison. L'action de la protéine *VIN3* et des protéines *VRN* illustre comment l'expression des gènes peut varier indépendamment d'une action directe sur leur transcription, par un mécanisme épigénétique (où l'expression des gènes est soumise à l'influence de l'environnement) qui agit sur l'enveloppe de l'ADN, la chromatine. Dans le noyau des cellules, l'ADN s'enroule autour de protéines, les histones, formant une longue fibre compactée et repliée sur elle-même, la chromatine. Or les protéines *VIN3* et *VRN* modifient la compaction et l'ouverture de

la chromatine et, par là, l'expression des gènes (voir l'encadré page 68).

En effet, les histones peuvent être chimiquement modifiées par des groupes méthyle, phosphate ou acétyle, qui constituent des milliers de « balises » placées à des endroits précis du génome. Ces marqueurs indiquent les sites de l'ADN, où la chromatine est plus ou moins lâche et où les gènes sont plus ou moins accessibles aux facteurs responsables de leur transcription, prélude à la synthèse des protéines correspondantes.

Ainsi, VIN3 se lie à la chromatine au niveau du gène *FLC*. Là, elle interagit avec un complexe enzymatique qui catalyse l'élimination de groupes acétyle et l'ajout de groupes méthyle sur certaines histones. Cela bloque transitoirement l'expression du gène *FLC*. Quant aux facteurs VRN (des enzymes), ils prolongent l'action de VIN3. Ils stabilisent la conformation localement fermée de la chromatine, de sorte que le blocage de l'expression du gène *FLC*, amorcé par l'action de VIN3, se prolonge.

C'est dans ce mécanisme épigénétique que se trouve l'explication de la mémoire de l'hiver. En effet, lorsque la cellule se divise, les « balises » sont remises en place sur les mêmes sites chromosomiques dans les cellules filles. Ainsi de division en division, le gène *FLC* reste inactif, y compris dans les cellules du méristème nées au printemps et qui n'ont jamais connu l'hiver. Lors des divisions nécessaires à la formation des cellules sexuelles (cellules mâles du grain de pollen et ovules), les balises chimiques présentes sur la chromatine sont retirées par d'autres enzymes, de sorte que les plantes de la génération suivante ont, à leur tour, besoin d'une vernalisation.

Sur la piste du florigène

Nous avons examiné comment la sortie de l'hiver coïncide avec la suppression de l'inhibition de la floraison. Cependant, même vernalisées, la plupart des plantes ne sont pas prêtes à s'épanouir : la floraison n'aura lieu que si la durée du jour est adéquate. C'est ce qu'ont mis en évidence dans les années 1920 les botanistes américains Wigntman Garner et Harry Allard. Les plantes qui ont besoin de jours longs (par exemple 14 heures de lumière par 24 heures) se reproduisent au printemps (moutard, campanules, églantine, saules,

épinards, blé de printemps) ; d'autres ne produisent des fleurs que lorsque les jours décroissent (chrysanthèmes, riz, soja, chénopode rouge, azalées). Parmi ces dernières, des espèces, dites de jour court obligatoire, ne fleurissent jamais que si les nuits ont plus de huit heures et pour certains, celle l'ipomée nil (*Pharbitis nil*) une plante volubile originaire d'Afrique, une seule nuit suffit à provoquer la floraison. D'autres espèces sont indifférentes à la photopériode : tomate, tournesol, concombre, haricot, maïs, etc.

En étudiant des plantes au comportement obligatoire, une propriété aussi essentielle que mystérieuse est apparue : contrairement au froid, la photopériode est perçue non pas par le méristème apical, mais par les feuilles. On peut provoquer la floraison d'une plante de jour court en exposant une série de ses feuilles à une longue nuit (en l'enveloppant pour cacher

BESOINS CROISSANTS DE VERNALISATION	Plantes de jours courts et vernalisation indispensable :	Plantes indifférentes à la photopériode et vernalisation indispensable :	Plantes de jours longs et vernalisation indispensable :
	Primevères Geraniums Fraisies Hellebores	Carottes - Haricot - Œillets	- Beaucoup de plantes - Asperges - Giroflée - Olivier
	Plantes de jours courts et vernalisation préférentielle :	Plantes indifférentes à la photopériode et vernalisation préférentielle :	Plantes de jours longs et vernalisation préférentielle :
	Chrysanthèmes Ipomées nil	- Cyclamen - Blé d'hiver	- Somme d'hiver - Oge d'hiver
	Plantes de jours courts et besoin nul de vernalisation :	Plantes indifférentes à la photopériode et à la vernalisation :	Plantes de jours longs et besoin nul de vernalisation :
	Tabac Dahlia	- Tomates - Muflier, pélargonium	- Cereales de printemps
BESOINS EN LUMIÈRE			

la lumière). La feuille produit donc un signal qui se propage dans la plante jusqu'au méristème.

Des expériences de greffe ont mis en évidence que ce signal peut se transmettre d'une partie à l'autre et même d'une espèce à l'autre. En 1937, le Russe Mikhail Chailakhyan nomma ce signal universel du nom de florigène. Dès lors, les scientifiques du monde entier n'ont eu de cesse de l'identifier. Ces recherches ont abouti en 2007.

Pour les comprendre, revenons sur la notion de perception de la photopériode. Comment la feuille détecte-t-elle les variations de la durée du jour ? Ce n'est pas la quantité de lumière qui importe. En effet,

Les plantes à fleurs n'ont pas les mêmes besoins d'exposition au froid (vernalisation) et à la lumière (photopériode). On trouve de multiples combinaisons entre ces facteurs, de sorte que les plantes pour lesquelles le froid et la lumière sont indispensables, jusqu'aux plantes qui ne nécessitent ni l'un ni l'autre.

L'AUTEUR



François PARCY est directeur de recherche au CNRS et professeur à l'École polytechnique, à Palaiseau. Il dirige l'équipe Étude des régulateurs floraux au Laboratoire de physiologie cellulaire végétale (UMR CNRS 5168-CEA-INRA 1200, Université Joseph Fourier), à Grenoble.

un court flash de lumière à un moment particulier d'une longue nuit, qui ne représente qu'un faible apport énergétique, suffit pour changer le comportement de la plante : par exemple, il empêche la floraison chez une plante de jour court.

Une fois de plus, c'est avec l'arabette des Dames et la méthode génétique que l'on a percé le mystère. *Arabidopsis* n'est pourtant pas un modèle idéal. C'est une plante de jours longs facultative ; elle fleurit plus vite quand les jours sont longs (par exemple 15 heures de lumière) : en environ quatre semaines au lieu de huit ; mais elle n'a pas un besoin absolu de jours longs (elle peut fleurir quand les jours sont courts). Or certains mutants d'arabette, dont le mutant *constans* (CO), ne perçoivent pas la photopériode et fleurissent avec retard, même si les jours sont longs. Le gène *constans*, altéré chez le mutant CO, a été identifié, ce qui a permis d'analyser la répartition dans l'espace et dans le temps de la quantité d'ARN messager et de la protéine correspondants.

L'ARN et la protéine CO sont présents dans les cellules de la feuille. Puisque les mutants *constans* fleurissent tardivement, on peut en déduire que la

protéine CO stimule la floraison. Effectivement, dans les plantes où l'on provoque par génie génétique une forte synthèse de cette molécule, les fleurs fleurissent très vite. L'équipe de George Coupland, de l'Institut Max Planck de Cologne, s'est donc penchée sur son mode d'action. Elle a découvert deux propriétés inattendues. Tout d'abord, la quantité de l'ARN messager codant la protéine CO suit un rythme circadien : elle est élevée la nuit, baisse le matin et remonte en fin d'après-midi. Ces oscillations sont quasiment les mêmes que les jours soient courts ou longs. Elles se poursuivent pendant quelques jours même dans l'obscurité totale : elles ne dépendent donc pas de la lumière, mais de l'horloge interne de la plante.

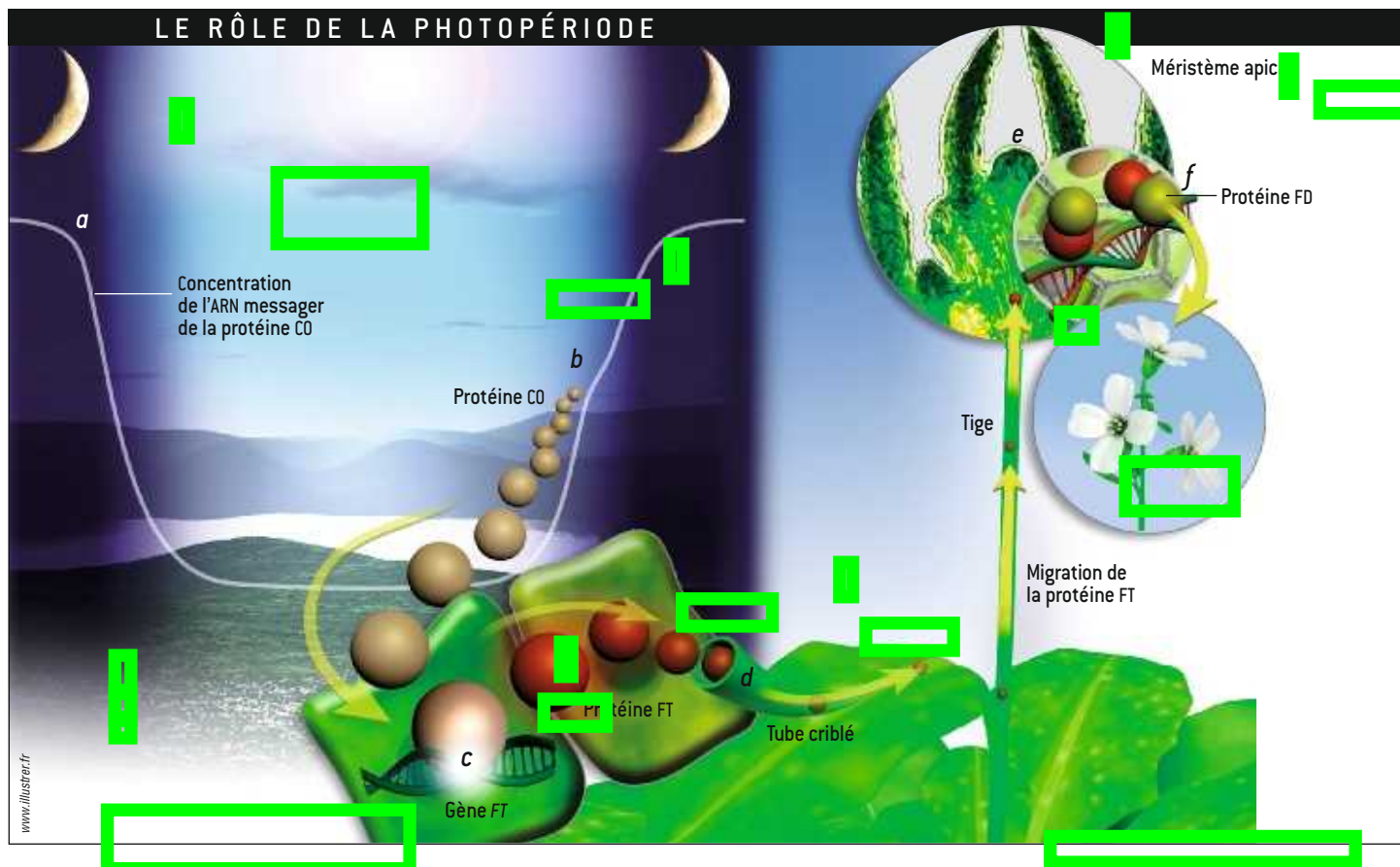
L'origine de la floraison : la feuille

À cette variation de concentration d'ARN messager de CO, se superpose une régulation de la protéine CO elle-même par la lumière. En effet, alors que certaines protéines restent stables durant des heures, celle de la protéine CO se dégrade (décomposée en cycles)

en quelques secondes par un complexe enzymatique, le protéasome. Or G. Coupland et ses collègues ont découvert que la protéine CO est stabilisée par la lumière et dégradée dans l'obscurité.

Ainsi, durant les périodes de jours courts, la production de l'ARN messager de CO ne coïncide jamais avec la présence de lumière, ce qui empêche l'accumulation de la protéine, et la floraison. Au contraire, quand les jours s'allongent, il existe un moment, en fin d'après-midi, où la quantité d'ARN messagers est suffisante et où la protéine CO produite est stabilisée par la lumière. Elle peut alors s'accumuler et activer la floraison (voir l'encadré ci-dessous).

C'est donc la coïncidence entre la synthèse de l'ARN messager de la protéine CO et la stabilité de cette dernière qui explique l'effet de la photopériode sur la floraison. La protéine CO était-elle le florigène recherché ? Migrerait-elle jusqu'à la pointe de la tige ? Non. En effet, une autre protéine, FT (*flowering locus T*), était aussi un florigène potentiel. Elle avait été identifiée en 1991 conjointement par l'équipe de Detlef Weigel, à l'Institut Salk de San Diego, et celle de Takashi Araki, de l'Université de Kyoto, en tant que stimulateur de la



✓ BIBLIOGRAPHIE

F. Parcy, La floraison, *Biologie végétale : croissance et développement*, sous la direction de J.F. Morot-Gaudry et R. Prat, vol. 2, chap. 6, pp. 157-181, Dunod, 2009.

S.D. Michaels, Flowering time regulation produces much fruit, *Curr. Opin. Plant Biol.*, vol. 12, pp. 75-80, 2009.

A. Giakountis et C. Coulton, Phloem transport of flowering signals, *Curr. Opin. Plant Biol.*, vol. 11, pp. 62-69, 2008.

J.A.D. Zeevaart, Leaf-produced floral signals, *Curr. Opin. Plant Biol.*, vol. 11, pp. 541-547, 2008.

Y. Kobayashi et D. Weigel, Move on up, it's time for change, *Genes & Dev.*, vol. 21, pp. 2371-2384, 2007. <http://genes.devcomp.org/content/21/19/2371.full>

✓ SITES WEB

L. Taiz et E. Zeiger, A Companion to Plant Physiology <http://4e.plantphys.net/index.php>

La durée du jour influe sur la floraison. Diverses protéines sont impliquées, dont les principales sont la protéine CONSTANS (CO, en marron), la protéine FT (en rouge) et la protéine FD (en vert). La quantité de l'ARN messager de la protéine CO dans les cellules des feuilles évolue en fonction du rythme circadien : l'ARN est synthétisé durant la nuit et en fin d'après-midi, mais pas dans le reste de la journée (courbe a). Plus il y a d'ARN messager, plus la protéine correspondante, CO, est synthétisée. Toutefois, cette protéine est stable à la lumière, alors qu'elle est dégradée dans l'obscurité. En fin d'après-midi (b), la quantité de protéines CO stables devient suffisante pour activer le gène FT, qui code la protéine FT (c). Celle-ci passe alors, par de petits canaux présents dans les parois cellulaires, dans les tubes criblés du phloème (d), qui véhiculent la sève. Elle est alors transportée dans la tige jusqu'aux cellules du méristème apical (e). Là, elle se lie à une autre protéine, nommée FLOWERING LOCUS T (FTL). Ensemble, ces deux protéines activent une série de gènes codant des protéines qui construisent le bouton floral, d'où sortira la fleur.

floraison. Une plante qui en est privée fleurit tardivement. Si au contraire, on lui fait produire par transgénèse une grande quantité de cette protéine, elle fleurit quasiment instantanément après la germination, en ne produisant qu'une ou deux feuilles ! La protéine FT est un puissant inducteur de la floraison.

D'autres recherches ont montré que la protéine CO stimule la synthèse de la protéine FT dans la feuille, en provoquant la transcription du gène correspondant. La grande différence entre les deux molécules, c'est que la première ne provoque la floraison que si elle est produite dans la feuille. Même si on force sa synthèse dans la pointe de la tige, la plante ne fleurit pas. Au contraire, la seconde FT déclenche la floraison lorsqu'on l'introduit dans la tige. Dans la feuille aussi bien que dans le méristème apical de la tige.

Le florigène : un rôle universel ?

Des deux molécules, la protéine FT semblait donc la meilleure candidate au titre de florigène. Restait à identifier la nature de la substance qui voyage dans la sève : est-ce l'ARN messager codant FT, la protéine elle-même, ou une autre molécule ?

Des chercheurs avaient observé, en comptant la protéine FT à une protéine fluorescente, qu'elle se déplace dans la sève. En 2007, l'équipe de Markus Schmid, de l'Institut Max Planck de Tübingen, montre que si l'on inhibe cette migration en attachant la protéine FT à une grosse protéine, on l'empêche d'agir depuis la feuille, mais pas depuis le méristème. Et dès que l'on fournit à la plante un enzyme qui détache FT de cette grosse protéine, elle agit de nouveau depuis la feuille. C'était la preuve que le florigène est bien la protéine FT.

On a ensuite décrypté son mode d'action : une fois arrivée dans la pointe de la tige, elle s'associe à un facteur de transcription (nommé FD, *flowering locus D*) et déclenche ainsi l'expression de la cascade des gènes et des protéines qui vont bâtir le bouton floral d'où surgira la fleur.

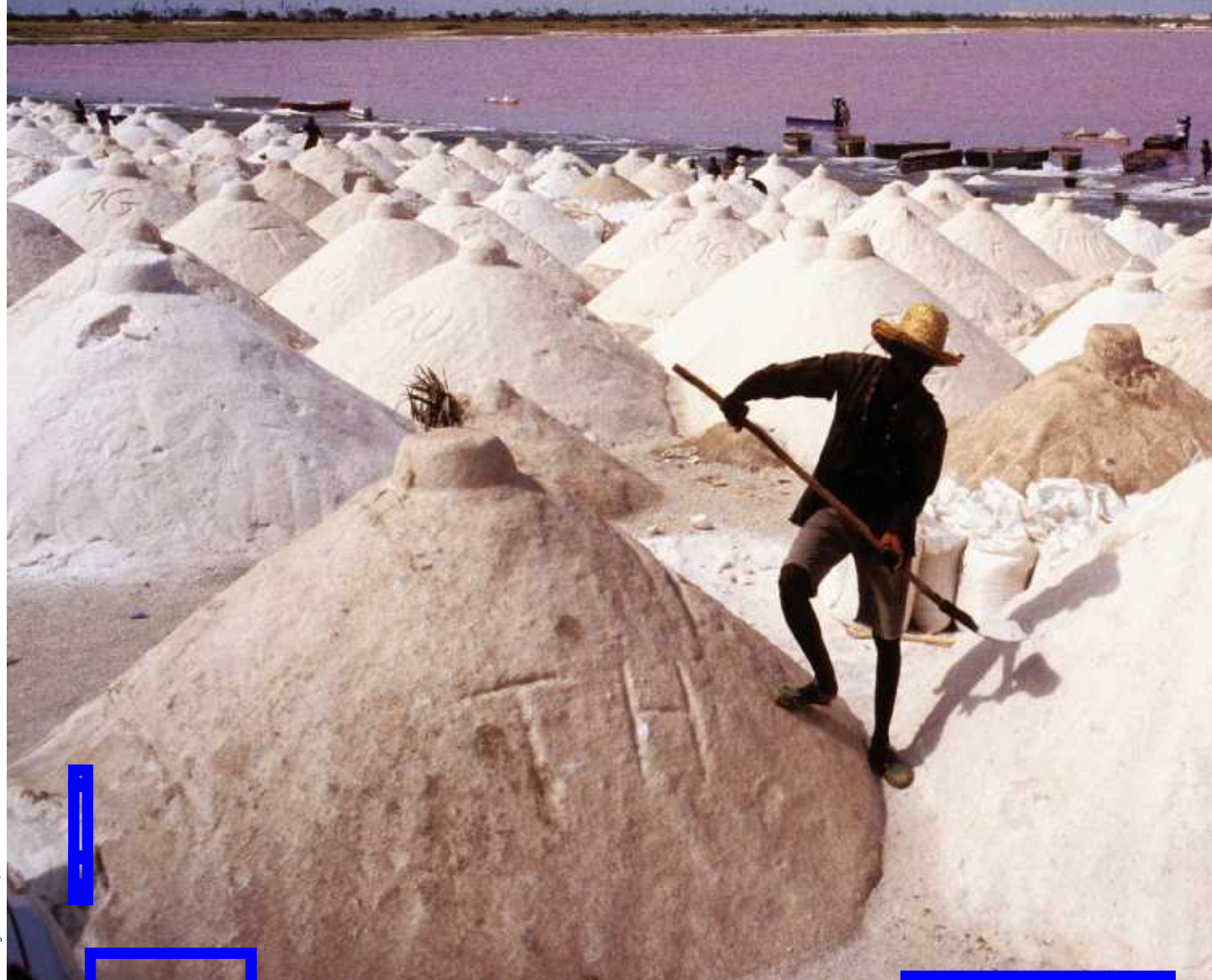
D'après les recherches menées jusqu'à présent, le rôle de la protéine FT semble universel chez les plantes à fleurs : par exemple, celle du tabac fait fleurir la tomate, celle de l'arabette fait fleurir le peuplier. Ses effets sur la floraison du peuplier sont doublement spectaculaires.

Un arbre a normalement une phase juvénile, qui dure 10 à 15 ans : bien que les conditions soient favorables chaque année au printemps, il croît sans jamais fleurir. Après cette phase sans fleurs, la floraison se produit chaque année. Or si l'on augmente par transgénèse la quantité de protéine FT dans des plantules de peupliers, la floraison se produit au bout de quatre à cinq semaines ! C'est ce qu'a montré en 2006 le groupe d'Ove Nilsson, de l'Université d'Umeå, en Suède. De quoi accélérer l'étude de l'amélioration des arbres par croisements entre variétés, peu avancée en raison du temps très long qui sépare deux générations. Qui plus est, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à la transgénèse : pour provoquer la floraison, il devrait suffire de greffer une branche qui produit de grandes quantités de protéine FT, si l'on extrapole les résultats obtenus avec l'arabette des Dames et la tomate.

La deuxième surprise est venue quand des arbres transgéniques synthétisant beaucoup de protéine FT ont été cultivés en jours courts. Dans ces conditions, un arbre normal se comporte comme à l'automne : il perd ses feuilles et arrête de grandir, et des écailles protectrices se forment autour des bourgeons. Or les arbres transgéniques surproduisant FT ont continué à pousser insensibles au changement de la photopériode. Cette expérience montre que la diminution de la quantité de florigène joue un rôle à l'automne quand les bourgeons entrent en dormance.

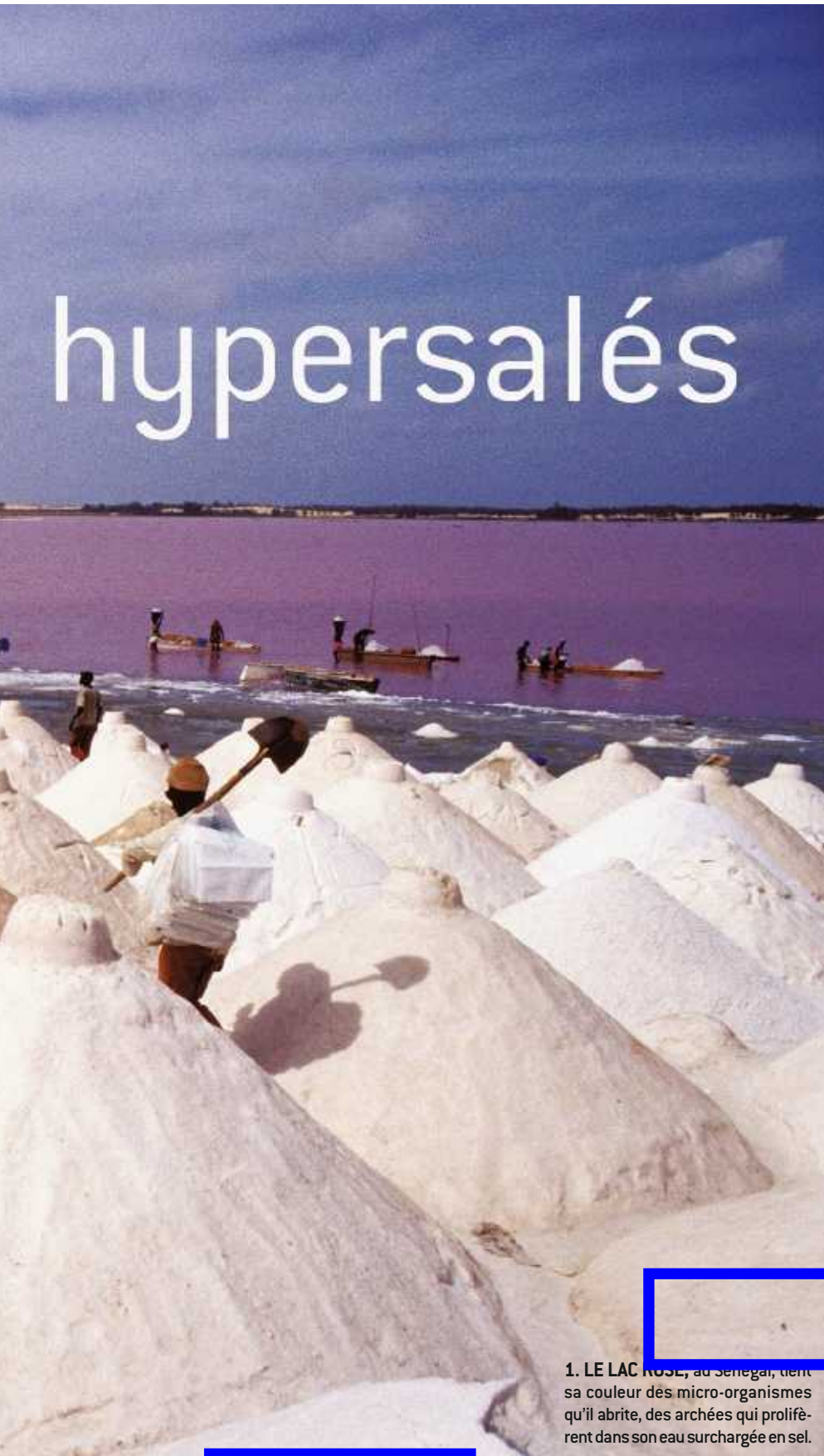
Pourtant, le florigène n'a pas encore livré tous ses secrets. Des études indiquent que le saccharose ou certaines hormones végétales sont d'autres facteurs mobiles capables de déclencher la floraison. Ils jouent sans doute un rôle complémentaire de celui de la protéine FT. Quoi qu'il en soit, les découvertes récentes sur la biologie de la floraison sont ainsi allées au-delà des espérances. Leurs applications potentielles sont nombreuses. Par exemple, en maîtrisant la floraison, on pourrait étendre les territoires de culture pour faire face à la demande grandissante. Il faudrait pour cela que les mécanismes découverts chez les plantes modèles soient généralisables aux différentes espèces cultivées. Les premières études semblent montrer que c'est effectivement le cas, l'évolution étant souvent plus prompte à ajuster d'une espèce à l'autre que qu'à en inventer de nouveaux. ■

Vivre dans des milieux



Ron Gilg/Peter Arnold, Inc.

hypersalés



1. LE LAC ROSE, au Sénégal, tient sa couleur des micro-organismes qu'il abrite, des archées qui prolifèrent dans son eau surchargée en sel.

Les haloarchées, des micro-organismes unicellulaires vivent, depuis des centaines de millions d'années, dans des milieux où la concentration en sel est parfois égale à dix fois celle de l'eau de mer !

Shiladitya DasGupta

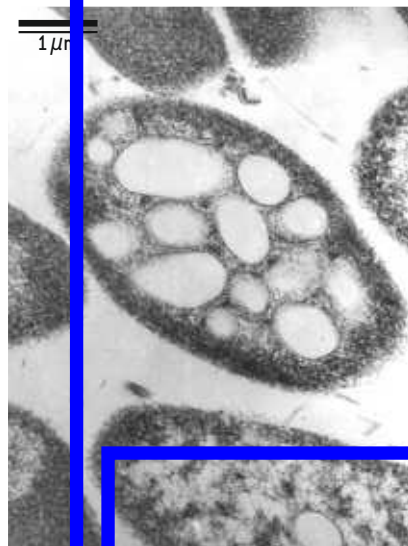
Plus que dans le lac Rose au Sénégal ou les étangs de la baie de San Francisco, aux États-Unis, ressemblent à des mosaïques de rouges et de violets (voir la figure 1). D'où viennent ces couleurs étonnantes ? Elles sont dues à des micro-organismes unicellulaires qui prospèrent dans ces eaux riches en sel, les archées halophiles, ou haloarchées. De quoi s'agit-il ?

Les archées, comme les bactéries, sont des procaryotes, c'est-à-dire des micro-organismes unicellulaires dépourvus de noyau. La distinction entre archées et bactéries est récente, elle date de 1977, quand Carl Woese, de l'Université de l'Illinois, à Urbana-Champaign, a mis en évidence des différences notables. Ainsi, les archées se distinguent des bactéries par des caractéristiques moléculaires proches de celles des eucaryotes, organismes dont les cellules sont pourvues d'un noyau comme les levures, les plantes ou les humains. Depuis, le vivant est divisé en trois règnes : les archées, les bactéries et les eucaryotes. Grâce aux archées, l'universalité du code génétique a été définitivement prouvée, car les trois règnes utilisent le même, à quelques petites variations près. Ce code, qui permet de stocker dans les gènes l'information nécessaire à la fabrication des protéines, est le même pour tous les organismes vivants !

Parmi les archées, les haloarchées sont à part : elles sont dites extrémophiles, car elles vivent dans des conditions extrêmes, en l'occurrence les milieux très riches en sel. Elles ont besoin d'une concentration minimale de 90 grammes de sel par litre d'eau pour croître et on les trouve dans les

poches de saumure profondément enfouies dans le sol, qui atteignent parfois une concentration de 340 grammes de sel par litre d'eau. Rappelons que la mer contient en moyenne 35 grammes de sel par litre. Cependant, contrairement à la majorité des autres organismes extrémophiles telles les bactéries qui ne vivent que dans des environnements bien particuliers, les haloarchées résistent à un grand nombre de conditions : elles vivent habituellement en présence d'oxygène, mais supportent son absence ; elles peuvent devenir phototrophes et utiliser l'énergie lumineuse ; elles survivent à des variations de température, d'acidité et de concentration en ions métalliques. Elles résistent aussi à la dessiccation et aux rayonnements ionisants. En outre, les archées halophiles sont aisément cultivables en laboratoire : saupoudrez-les dans de l'eau de mer, et le tour est joué !

Les haloarchées sont des cellules de formes très diverses. Par exemple, *Halobacterium* NRC-1, l'organisme dont il sera surtout question dans cet article, est une cellule ronde remplie de petites vésicules de gaz (voir la figure 2). Lorsqu'elle est mise en culture, la solution devient rapidement rose vif. Cette archée contient en effet des pigments spécifiques qui confèrent sa couleur à la solution. Ces pigments sont en partie regroupés dans une membrane cellulaire modifiée nommée « membrane pourpre ». À l'instar des bactéries, les



2. *HALOBACTERIUM* NRC-1, observée ici au microscope électronique à transmission, est dotée de vésicules de gaz grâce auxquelles la cellule flotte et peut ainsi gagner des eaux de surface où elle peut capter plus de lumière.

haloarchées n'ont pas de noyau, et leur ADN « flotte » à l'intérieur de la cellule.

Les haloarchées sont donc originales à plusieurs titres. L'étude de leur génome a révélé des propriétés étonnantes et a éclairci en partie le mystère de leur origine. Désormais, on comprend mieux comment ces micro-organismes survivent dans des milieux aussi divers que les cheminées hydrothermales ou les marais salants dépourvus d'oxygène.

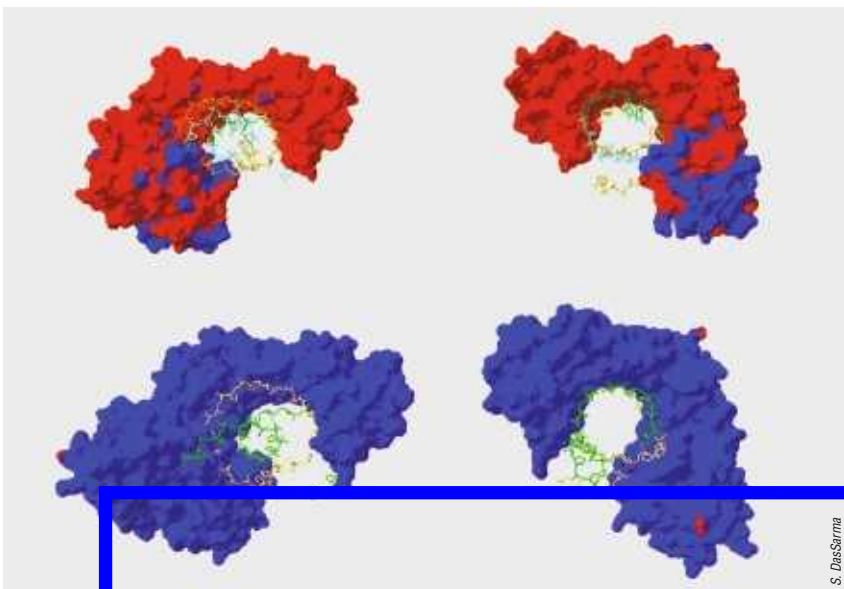
Halobacterium NRC-1 fut la première haloarchée (et l'une des toutes premières archées) dont on a étudié le génome. NRC-1 est à maints égards une haloarchée type, largement répandue dans les milieux hypersalins. Le génome de cette espèce est spontanément instable, de sorte que des voies métaboliques entières sont parfois modifiées.

Quand l'ADN parle...

Cette curiosité s'explique par la présence d'un grand nombre d'éléments génétiques mobiles, similaires aux « gènes sauteurs » (ou transposons) décrits par la généticienne Barbara McClintock chez le maïs. Les transposons sont des fragments d'ADN qui se détachent, se multiplient et s'insèrent au hasard en d'autres endroits du génome. De la sorte, ils bouleversent le fonctionnement de certains gènes, par exemple en augmentant leur expression ou en la diminuant. Ce sont des éléments essentiels dans l'évolution des génomes, car ils sont source de nouveauté. C'est la première fois que de tels éléments ont été découverts chez une archée.

Nos études ont montré que le génome de NRC-1 est constitué d'un grand chromosome circulaire, et de deux petits brins d'ADN également circulaires, des plasmides nommés pNRC100 et pNRC200. Outre des séquences communes, ces plasmides contiennent beaucoup de transposons, des motifs répétés qui peuvent déplacer des fragments de plasmide et donc en modifier l'expression. Environ 40 gènes de ces plasmides coderaient des protéines indispensables, notamment les enzymes de la synthèse de l'ADN et de l'ARN. La cellule ne pourrait fonctionner sans ces gènes. Les plasmides pNRC sont des minichromosomes plutôt que des plasmides, qui sont par définition non essentiels.

Nous fûmes surpris de découvrir que les 2630 protéines de *Halobacterium* NRC-1 sont en moyenne beaucoup plus



3. LA FORME D'UN COMPLEXE PROTÉIQUE (constitué de deux protéines, TBP et TFB) se liant à l'ADN est semblable chez *halobacterium* NRC-1 (en haut) et chez *homo sapiens* (en bas), même après plusieurs millions d'années d'évolution divergente. Cependant, les charges électriques de surface sont distinctes : le rouge marque les charges négatives des régions protéiques acides, tandis que le bleu correspond aux charges positives des parties basiques.

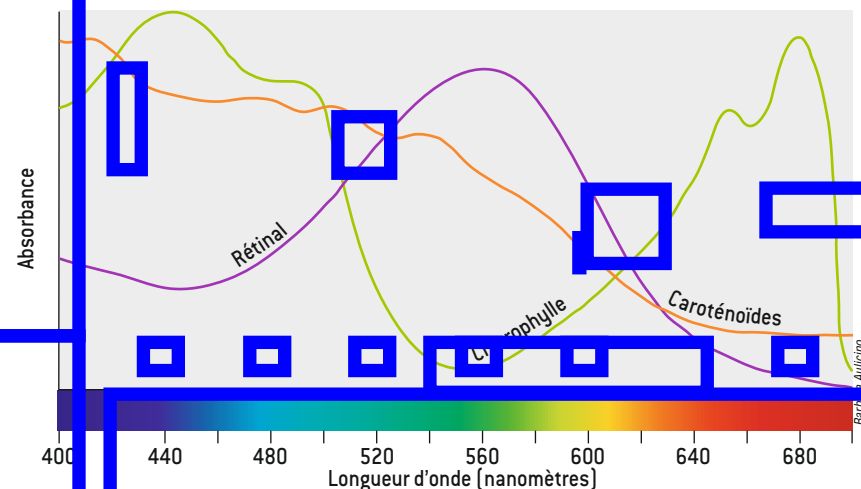
acides que celles d'autres organismes (voir la figure 3). Le point isoélectrique moyen (une mesure de l'acidité) de ces protéines n'est que de 4,9 alors que chez presque toutes les autres espèces d'haloarchées il est proche de 7. Or le radical de telles protéines acides porte des charges négatives qui devraient repousser d'autres molécules chargées négativement dans la cellule tels l'ADN et l'ARN. Dès lors, comment les protéines de la réplication par exemple, peuvent-elles se lier à l'ADN? Peut-être grâce à des ions positifs qui s'intercalent entre les deux molécules.

Pourtant, l'acidité des protéines de *Halobacterium* NRC-1 est essentielle. En effet, puisque des protéines chargées négativement se repoussent, elles ne précipitent pas dans les conditions où des protéines neutres le feraient. Ces haloarchées ont donc besoin de protéines extrêmement acides pour maintenir leurs fonctions cellulaires dans un environnement sur-saturé en sel.

Le séquençage du génome de *Halobacterium* NRC-1, en 2000, a modifié nos connaissances sur l'histoire évolutive des haloarchées. Bien que ces résultats aient confirmé l'appartenance de NRC-1 à la lignée des archées, l'analyse phylogénétique classique est impossible... En effet, les biologistes utilisent le gène d'un ARN dit 16S comme marqueur de l'évolution pour comparer les espèces. Or celui de *Halobacterium* NRC-1 est unique en son genre : si divergent des autres qu'il n'autorise aucune comparaison.

Pour contourner cet obstacle phylogénétique, nous avons comparé la totalité du génome de NRC-1 à quelques autres génomes microbiens disponibles. Nous avons ainsi mis en évidence des similitudes entre *Halobacterium* NRC-1 et deux bactéries (*Bacillus subtilis* et *Deinococcus radiodurans*). Toutefois cette étude est restée sans suite, et nous avons eu la surprise de constater quelques années plus tard que la position de *Halobacterium* sur l'arbre du vivant semblait se déplacer, soit vers la branche des archées, soit, de façon surprenante, vers une branche des bactéries... (voir la figure 6).

Ce nouvel emplacement était en désaccord avec les analyses précédentes qui faisaient de *Halobacterium* une archée. Pourtant, des travaux ont montré que NRC-1 contenait presque autant de gènes bactériens que de gènes d'archées. Une explication possible est qu'au fil du temps, les archées halophiles ont acquis de nombreux gènes



4. LES CAROTÉNOÏDES protègent les micro-organismes de la lumière violette et ultraviolette en les absorbant (en orange). Ils réfléchissent la lumière rouge orangée, ce qui donne aux sables leurs nuances écarlates. Le rétinol absorbe la lumière verte et réfléchit les lumières rouge et violette, ce qui lui donne une couleur pourpre (en violet). Complémentaire du rétinol, la chlorophylle absorbe le bleu et le rouge et réfléchit le vert (en vert).

d'espèces bactériennes non apparentées, selon un processus nommé transfert horizontal de gènes. Il s'agit du passage d'un morceau d'ADN d'un organisme à un autre de la même espèce ou d'une autre espèce. Ce transfert horizontal, un organisme vivant se dote de nouveaux gènes.

Une étonnante protéine

Cette hypothèse est étayée par plusieurs observations. Ainsi, les gènes autorisant le métabolisme aérobie (en présence d'oxygène) de *Halobacterium* sont arrangés de la même façon que ceux de la bactérie *Escherichia coli*. En outre, des gènes ribosomiaux (les gènes codant les différents éléments des ribosomes, des « machines » qui traduisent les ARN en protéines) ressemblent à ceux d'archées anaérobies (vivant sans oxygène) et des gènes métaboliques semblables à ceux de bactéries aérobies sont associés au sein du génome, indiquant que les haloarchées ont probablement « dérobé » des pièces de la machine respiratoire via des transferts horizontaux de gènes bactériens. Un exemple chez *Halobacterium* NRC-1 est celui du gène codant l'arginyl-ARNt synthétase (ArgS) une enzyme indispensable à la fabrication des protéines. Les cousines les plus proches de la protéine ArgS de NRC-1 sont les protéines ArgS de bactéries et non celles d'autres archées ou haloarchées. Cette situation est en accord avec l'histoire de NRC-1, dont les ancêtres présumés

L'ESSENTIEL

✓ Les archées constituent l'un des trois règnes du vivant. Certaines, dites halophiles, se développent dans des milieux très salés.

✓ *Halobacterium* NRC-1 est l'une d'elles. Son étude révèle comment ces organismes survivent dans des milieux extrêmes. Parmi ces adaptations, citons le caractère acide des protéines.

✓ Le transfert de gènes, notamment bactériens, est une autre adaptation qui confère aux micro-organismes de nouvelles propriétés.

✓ La bactériorhodopsine est une protéine grâce à laquelle *Halobacterium* NRC-1 utilise l'énergie lumineuse dans des environnements pauvres en oxygène.

étaient des prédateurs de bactéries. Il reste que le gène original de NRC-1 a été perdu au cours de l'épisode.

Chez les haloarchées, une autre découverte importante est celle de la bactériorhodopsine. D'abord identifiée par Walther Stoeckenius, de l'Université de Californie, à San Francisco, cette protéine utilise les photons de la lumière solaire pour expulser les ions hydrogène (H^+) vers l'extérieur de la cellule, ce qui crée une différence de potentiel de part et d'autre de la membrane. Un autre groupe de protéines,

D'où vient cette protéine? Elle ressemble à la rhodopsine des mammifères, une protéine fabriquée dans les yeux où elle capte la lumière. Les deux protéines contiennent le même pigment, le rétinol, un dérivé des caroténoïdes. *Halobacterium* NRC-1 et quelques autres haloarchées ont également d'autres protéines serties de rétinol, notamment la narhodopsine, qui pompe les ions chlorure à travers la membrane, et une rhodopsine photosensible, capable de distinguer les sources de lumière utiles et néfastes afin de modifier le comportement de nage

à plusieurs centaines de millions d'années. Une autre hypothèse met en jeu un transfert horizontal des gènes codant ces protéines entre les haloarchées, des bactéries planctoniques et certains champignons.

La phylogénie des pigments contenant du rétinol reste peu concluante. Néanmoins, on peut postuler qu'ils ont coévolué avec des pigments à base de chlorophylle. En effet, la comparaison des spectres d'absorption de la lumière visible des pigments révèle que le rétinol et la chlorophylle sont complémentaires, c'est-à-dire non chevauchants (voir la figure 4). Selon l'hypothèse de la coévolution, deux phases de l'histoire de la vie se sont succédé sur Terre. La première phase, anaérobie, est la « phase pourpre » car les organismes vivants de cette époque captaient la lumière solaire grâce à des protéines fonctionnant au rétinol. Plus tard, des pigments plus complexes de type chlorophylle ont pu évoluer pour récolter la lumière dans des régions du spectre solaire non absorbées par les espèces préexistantes. C'est le début de la photosynthèse *stricto sensu*, et donc de l'oxygénation de l'atmosphère. Le succès de cette stratégie a conduit à la « phase verte » de l'évolution de la Terre. Ces changements auraient sonné le glas de la plupart des micro-organismes à rétinol. Selon ce scénario, le mode de production d'énergie par absorption de la lumière solaire, fondé sur le rétinol, est l'un des systèmes métaboliques les plus anciens sur Terre.

Les haloarchées résistent à de nombreuses conditions qui tueraient d'autres microbes. Par exemple, *Halobacterium* NRC-1 peut résister à un rayonnement solaire et ionisant intense, qui endommage gravement l'ADN de la plupart des organismes. En effet, NRC-1 produit d'autres pigments, des caroténoïdes, qui absorbent les particules de lumière à haute énergie tels les ultraviolets et la lumière bleue. Ces pigments réfléchissent l'orange et le rouge, ce qui explique les teintes orangées que peuvent parfois prendre les marais salants. NRC-1 fabrique également deux fois plus d'enzymes réparatrices de l'ADN que les autres archées, car elle dispose des versions bactériennes et archéobactériennes de ces protéines.

L'une de ces protéines, la photolyase, répare les dommages causés par les ultraviolets. Ces rayonnements déclenchent également la production d'une enzyme, la recombinaise, qui participe à la réparation de l'ADN en favorisant la recombinaison.

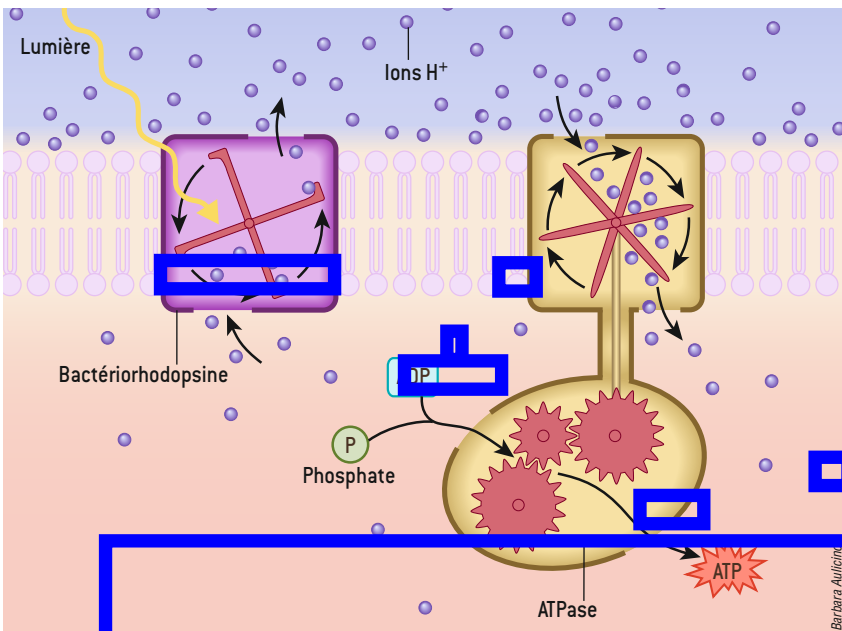
LE GÉNOME D'*HALOBACTERIUM* NRC-1

contient presque autant de gènes qui proviennent de bactéries que de gènes d'archées.

l'ATPase, capte l'énergie du flux de protons essayant de rentrer dans la cellule et crée de l'énergie utilisable par la cellule (voir la figure 5). Chez les archées, les molécules de bactériorhodopsines sont réunies dans une région de la surface cellulaire, la membrane pourpre, où elles récoltent l'énergie lumineuse dans les environnements pauvres en oxygène. Elle absorbe les longueurs d'onde dans le vert et réfléchit le bleu et le rouge, ce qui donne cette couleur pourpre rose aux salines.

de la cellule. Par exemple, si la quantité de lumière est trop faible, la rhodopsine déclenche la formation des vésicules de gaz: la cellule monte vers la lumière.

Les biologistes débattent sur l'histoire de ces anciennes protéines contenant du rétinol. Des récentes études ont mis en évidence des protéines similaires chez de nombreuses autres bactéries et chez des eucaryotes. Par conséquent, ces protéines ont pu apparaître avant que les archées, les bactéries et les eucaryotes ne divergent, il



5. LA BACTÉRIORHODOPSINE est une protéine essentielle pour les haloarchées. De couleur pourpre, elle confère une teinte rose aux colonies d'archées halophiles. Elle utilise l'énergie lumineuse pour transporter les protons (en violet) de l'intérieur vers l'extérieur de la cellule. Grâce au flux de protons inverse, la protéine ATPase fabrique de l'ATP, la molécule qui fournit de l'énergie aux autres rouages de la cellule.

son homologue: dans ce processus, l'enzyme échange la partie détériorée d'un brin d'ADN avec le fragment équivalent d'un brin homologue intact. Une troisième enzyme, l'exonucléase, excise totalement des morceaux d'ADN endommagé.

Les rayonnements de haute énergie et la dessiccation produisent un autre type de dommage génétique, consistant en une cassure des deux brins d'ADN. La cellule irradiée réagit à cette destruction en produisant plus de protéines RecA. Cette protéine se lie à l'ADN simple brin et enclenche une cascade de réactions qui conduit à la réparation de la cassure et au retour de l'ADN sous sa forme de double hélice.

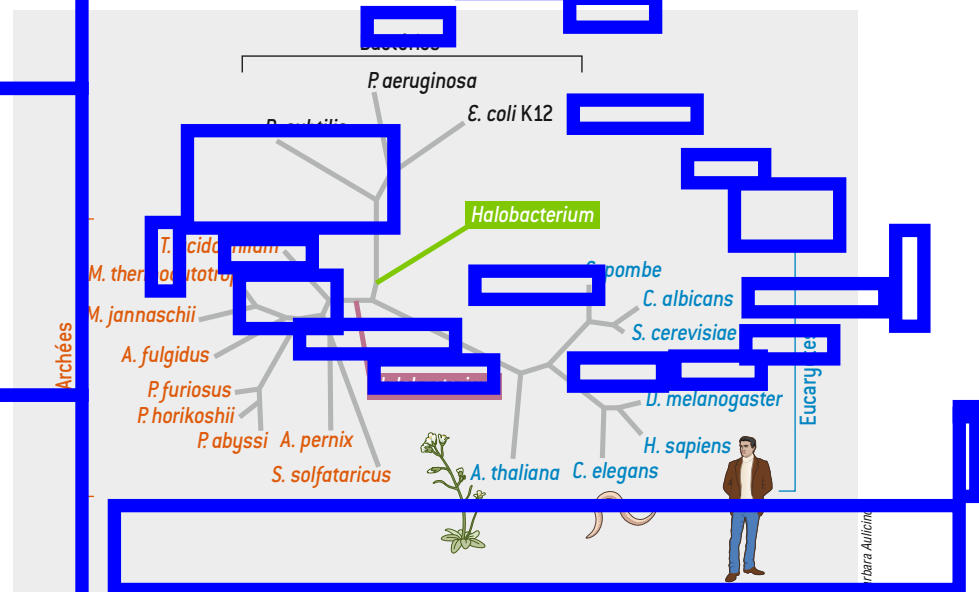
Les métaux toxiques et les concentrations fluctuantes en ions sont également des stress importants pour la cellule: *Halobacterium* NRC-1 y résiste grâce à plusieurs gènes. Par exemple, les cellules contrecarrent les effets de l'arsenic (qui bloque la production d'énergie et l'activité des protéines) en activant un groupe de gènes codant des enzymes qui modifient l'état d'oxydation du métal et le préparent à un transport actif hors de la cellule. Un autre gène ferait partie d'un second système de détoxification, qui transforme l'arsenic en une forme volatile, la triméthylarsine.

Enfin, l'une des conditions les plus stressantes pour les haloarchées est le manque ou l'absence d'oxygène, car la production d'énergie utilisant l'oxygène devient alors impossible. NRC-1 réagit de plusieurs façons. L'une d'elles consiste à élaborer des vésicules emplies de gaz grâce auxquelles les cellules flottent et rejoignent donc des zones aérobies en surface. Dans ces conditions, NRC-1 fabrique plus de bactériorhodopsine et améliore la capture de la lumière.

En avant... Mars

Cependant, en l'absence irrémédiable d'oxygène, les cellules optent pour un autre mode de conversion de l'énergie, qui utilise le diméthyle sulfoxyde produit par d'autres microbes et la triméthylamine N-oxyde produit par les poissons (dans le cas où NRC-1 vit en mer), pour effectuer la « respiration anaérobie ».

Nous ne savons pas encore comment NRC-1 régule les différents groupes de gènes en fonction de l'environnement, mais nous avons proposé un mécanisme qui explique le passage de ce micro-organisme



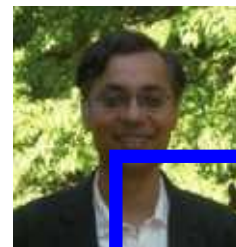
6. LA POSITION DE HALOBACTERIUM NRC-1 sur l'arbre phylogénétique pose encore des problèmes. Selon les parties du génome étudiées, le micro-organisme est soit une bactérie (en vert), soit une archée (en violet).

Nous pensons que deux facteurs de transcription généraux, TBP et TFB, agissent eux-mêmes en tant que régulateurs. Les facteurs de transcription sont des protéines qui régulent l'expression d'un gène, ce qui augmente ou diminue la quantité intracellulaire d'une protéine codée par ce gène. Bien que les protéines TBP et TFB soient habituellement codées chacune par un seul gène chez les archées et les eucaryotes, *Halobacterium* NRC-1 contient six gènes codant le facteur TBP et sept codant le TFB, augmentant le nombre de combinaisons possibles de TBP et TFB au cours de la transcription. Des paires spécifiques pourraient ainsi activer des ensembles de gènes destinés à travailler de concert, par le biais de séquences régulatrices trouvées près des gènes en question. Notre hypothèse

est étayée par de récents travaux mettant en évidence un nouveau mécanisme régulateur de ce type chez les haloarchées.

Grâce à leur machinerie cellulaire complexe, probablement empruntée en partie à d'autres organismes, les haloarchées font preuve d'une remarquable robustesse en survivant dans des milieux pour le moins inhospitaliers. On peut même les conserver plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'années dans des cristaux de sel ! Ces formidables adaptations aux milieux « difficiles rappellent les conditions qui règnent sur... Mars. Alors, à quand la découverte d'une forme de vie semblable sur la planète rouge ?

L'AUTEUR



Shiladitya DASSARMA travaille au Centre de biotechnologie marine, à l'Université du Maryland.

Nous remercions l'*American Scientist* de nous avoir autorisés à publier cet article.

BIBLIOGRAPHIE

L. DeVeaux et al., Extremely radiation-resistant mutants of a halophilic archaeon with increased single-stranded DNA binding protein (RPA) gene expression. *Radiation Res.*, vol. 168, pp. 504-514, 2007.

J. Coker et al., Genetic and transcriptomic analysis of transcription factor genes in the model halophilic Archaeon: Coordinate regulation of TbpD and TfbA, *BMC Genetics*, vol. 8, p. 61, 2007.

S. DasSarma, Extreme halophiles are models for astrobiology. *Microbe*, vol. 1, pp. 120-121, 2006.

LES LIMITES DE LA SCIENCE

Nourrir la planète : quelles limites ?

Dans une quarantaine d'années, la population mondiale dépassera neuf milliards de personnes. Comment les nourrir ? Ce défi se heurte à de nombreuses limites, notamment augmenter la production agricole tout en respectant l'environnement.

Entretien avec **Hervé GUOMARD**, directeur scientifique à l'Institut national de la recherche agronomique, INRA.

→ Pour la Science

Dans l'histoire de l'humanité, les famines ont été fréquentes et dévastatrices. Aujourd'hui, quelles sont les populations les plus exposées ?

→ Hervé Guomard

Durant les dernières décennies, c'est principalement l'Afrique qui a été touchée, les épisodes de famine les plus récents étant ceux du Darfour en 2004, du Niger en 2005, du Zimbabwe aujourd'hui. En ce début du XXI^e siècle, la faim dans le monde est plus une question d'accès à l'alimentation qu'un manque de nourriture à l'échelle de la planète. C'est en premier lieu un problème de répartition déséquilibrée des ressources alimentaires qui pénalise les pays les plus pauvres.

→ Pour la Science

En laissant les famines de côté, quelle est la proportion de la population mondiale souffrant de sous-nutrition ?

→ Hervé Guomard

Il n'y a plus de famines dans les pays développés (États-Unis, Europe, Australie, Japon, etc.). Ce constat ne doit cependant pas occulter le fait que même dans les pays dits riches, une proportion non négligeable de la population (environ dix pour cent) souffre encore, plus ou moins régulièrement, de la faim. À l'échelle mondiale, la sous-nutrition concerne essentiellement le monde en développement, notamment les pays les plus pauvres. Sur les six milliards d'habitants que compte la planète, plus d'un milliard souffrent de sous-nutrition et un milliard de maladies non

transmissibles liées à une alimentation excessive ou déséquilibrée, en premier lieu l'obésité. Nous sommes face à un paradoxe, désigné sous le terme de double fléau : les pays en développement sont simultanément face à des problèmes de sous-nutrition et de surnutrition.

→ Pour la Science

La révolution verte a permis d'accroître la production agricole dans les pays en développement, surtout dans les pays asiatiques. Comment s'est passée cette transition ?

→ Hervé Guomard

Dans les pays développés de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), on associe la « révolution agricole » à la diffusion du machinisme au début du siècle dernier. Le tracteur a permis non seulement d'accroître les surfaces cultivées, mais aussi et surtout d'augmenter la productivité du travail agricole, c'est-à-dire le nombre d'hectares mis en valeur par un seul homme. La force de travail ainsi libérée a pu satisfaire les besoins de main-d'œuvre du secteur industriel alors en expansion. Les machines sont progressivement devenues de plus en plus performantes. En même temps, les progrès en matière de sélection des variétés cultivées et le recours croissant aux engrais minéraux et aux produits de traitement des cultures pour lutter contre les mauvaises herbes, champignons, ravageurs, etc., ont permis d'augmenter les rendements. En Europe et aux États-Unis, ce mouvement de modernisation et d'in-

dustrialisation de l'agriculture s'est accéléré au lendemain de la Seconde Guerre mondiale. En Asie, l'évolution fut plus tardive. Connue sous le nom de révolution verte, l'Asie est parvenue à augmenter les rendements (comme indiqué précédemment via la sélection de variétés performantes, l'emploi d'engrais et de produits de traitement des cultures, et/ou le recours à l'irrigation) ; en revanche, la mécanisation a joué ici un rôle moins important. Jusqu'à présent, l'Afrique est restée à l'écart de ce mouvement. Aujourd'hui, nous sommes confrontés à deux défis agricoles : dans les pays où les rendements sont d'ores et déjà élevés, comment maintenir les niveaux actuels de production, voire les augmenter, tout en réduisant les pressions négatives sur l'environnement liées à une utilisation souvent excessive de substances chimiques ? Dans les pays en développement, plus particulièrement en Afrique, comment accroître la production et protéger les ressources naturelles ?

→ Pour la Science

Existe-t-il des espèces végétales particulièrement adaptées pour répondre à ce défi ?

→ Hervé Guomard

Très peu d'espèces cultivées – environ une trentaine – assurent l'essentiel de notre nourriture. En outre, le nombre d'espèces cultivées a tendance à diminuer, de même que le nombre de variétés au sein de chaque espèce. Les céréales viennent en tête avec un total mondial d'un peu plus de deux milliards de tonnes (essentiellement

le blé, le maïs et le riz). Puis viennent, mais loin derrière, les tubercules (pomme de terre, manioc, igname, patate douce, etc.) avec une production mondiale d'environ 800 millions de tonnes. Plus loin encore, arrivent les plantes oléagineuses (soja, arachide et en Europe, essentiellement colza et tournesol) et les plantes sucrières (canne à sucre et en Europe, essentiellement betterave à sucre). Par ailleurs, une faible proportion seulement de la production agricole mondiale (environ dix pour cent) est échangée sur les marchés internationaux, de sorte que les prix mondiaux « sur-réagissent » à toute variation du commerce mondial, à la baisse en cas d'excès de l'offre destinée à l'exportation comme à la hausse en cas de déficit.

→ Pour la Science

Une partie des céréales commercialisées est stockée. Comment sont organisés ces stockages ?

→ Hervé Guyomard

Le stockage des produits agricoles peut être assuré par les autorités publiques ou des opérateurs privés, éventuellement subventionnés et délégués à cette fin par les États. Il peut répondre à un objectif strictement commercial – pour écouler la production au moment où les prix sont au plus haut –, mais aussi à des considérations géopolitiques dans le cadre des stocks dits stratégiques. À l'échelle de la planète, il n'existe pas de politique concertée de stockage des denrées agricoles visant à faire face à des situations de manque dans certains pays et à limiter les fluctuations des cours mondiaux. Soulignons enfin la difficulté d'évaluer tant la quantité que la qualité des stocks quand ces derniers sont détenus, au moins pour partie, à des fins stratégiques (comme c'est le cas des stocks de céréales en Chine, par exemple).

→ Pour la Science

Quelles mesures ont été prises pour maintenir les stocks ?

→ Hervé Guyomard

En un mot : aucune ! Jusqu'au début de la décennie 1990, les États-Unis et l'Union européenne ont assuré conjointement le

rôle de « stockeur mondial », principalement sous la forme de stocks de céréales, pour soutenir leurs agricultures et leurs agriculteurs. Mais stocker coûte cher. Les États-Unis et l'Union européenne ont donc adopté diverses mesures visant à réduire leurs stocks, de façon à réaliser des économies budgétaires. Cette décision politique a été amplifiée par un recours commercial aux stocks pour l'offre agricole de la décennie 1990 était insuffisante pour répondre à la demande alimentaire, mais aussi à partir des années 2000 à une demande non alimentaire (principalement pour la production de biocarburants). C'est ainsi que les stocks mondiaux de céréales sont tombés en 2007 à leur plus bas niveau historique depuis 25 ans, soit environ 150 millions de tonnes (l'équivalent de deux mois de consommation mondiale). Nul doute qu'il s'agit là d'un déterminant majeur de la flambée des prix agricoles mondiaux constatée à partir de la fin de l'année 2006.

→ Pour la Science

Est-ce cette flambée des prix qui explique les récentes émeutes de la faim ?

→ Hervé Guyomard

Pour comprendre pourquoi il y a eu ces émeutes de la faim, il nous faut commencer par expliquer pourquoi les prix agricoles ont flambé en 2007 et durant les premiers mois de l'année 2008.

Au début des années 1990, le rythme de croissance de la production agricole mondiale s'affaiblit alors que la demande alimentaire reste dynamique sous l'effet de la démographie, de la croissance économique (notamment dans les pays en développement) et de l'urbanisation. Les stocks mondiaux de produits agricoles servent à pallier le déficit de l'offre relativement à la demande, et ils commencent à diminuer. Au début des années 2000, la demande non alimentaire croissante en biens agricoles pour la production d'agrocarburants, l'augmentation du prix du baril du pétrole et la dépréciation du dollar contribuent à la diminution des stocks et aux premières augmentations des prix agricoles. D'abord modérées, ces augmentations se sont produites de la fin de l'année 2006 jusqu'aux premiers mois de l'année 2008. S'y ajoutent des événements qui vont encore réduire les quantités disponibles sur les marchés mondiaux (des accidents climatiques notamment) et augmenter la demande en biens agricoles (spéculation sur les matières premières agricoles et mesures d'encouragement des importations).

La flambée des prix agricoles s'explique donc par un ensemble de facteurs et on ne peut identifier un unique responsable. Cette flambée des cours a engendré les émeutes de la faim du premier semestre 2008, non pas parce qu'il n'y avait pas de matières premières agricoles disponibles, mais parce que leur coût d'acquisition était devenu trop

Mieux gérer les stocks mondiaux de céréales reste un enjeu essentiel.



élevé pour les pays les plus pauvres, et plus particulièrement pour les ménages les plus modestes qui consacrent l'essentiel de leurs maigres revenus à l'alimentation. On estime que le nombre de personnes souffrant de la faim a ainsi augmenté de près de 100 millions, ruinant en quelques mois les efforts de deux décennies et portant le nombre de personnes souffrant de la faim dans le monde à près d'un milliard, comme nous l'avons évoqué.

Que s'est-il passé ensuite ? Les émeutes de la faim ont cessé, certes parce que les gouvernements locaux ont réagi (du moins ceux dotés de ressources budgétaires), certes parce que la solidarité internationale a joué (de façon modeste toutefois), mais surtout parce que les prix agricoles ont diminué à compter de l'été 2008 de façon aussi rapide qu'ils avaient augmenté. Pourquoi ? Parce que plusieurs facteurs qui avaient joué à la hausse se sont inversés et ont ainsi exercé une pression à la baisse sur les prix : augmentation des surfaces cultivées et des rendements, bonnes conditions climatiques, diminution du prix du baril du pétrole, raffermissement du cours du dollar, fin de la spéculation sur les matières premières agricoles en réaction, d'abord à la crise des *subprimes* aux États-Unis, ensuite à la crise financière et bancaire mondiale. En d'autres termes, les émeutes de la faim ont cessé parce que la conjoncture a entraîné une baisse des prix agricoles mondiaux et non parce que des mesures politiques efficaces avaient été adoptées. Les mêmes causes produisant les mêmes effets, la planète n'est pas à l'abri de nouvelles émeutes de la faim si la conjoncture est à nouveau défavorable — les stocks mondiaux n'ont été que très partiellement reconstitués — et si l'on ne met pas en place des dispositifs internationaux de lutte contre la volatilité des prix agricoles.

→ Pour la Science
Quelle leçon en tirer pour demain ?

→ Hervé Guéromard
Dans un contexte de mondialisation croissante des économies, les alternances de phases de déficit et de surplus, s'accompagnant d'alternances de hausses et de baisses des prix agricoles, devraient se mul-

tiplier dans la mesure où rien n'est fait — ou si peu — au plan mondial pour lutter contre cette instabilité. Les périodes de hausse des prix pénalisent tous les consommateurs, urbains comme ruraux. Les périodes de baisse fragilisent les producteurs agricoles et réduisent les incitations à investir dans l'activité agricole. L'instabilité des cours agricoles nuit au plus grand nombre, aux consommateurs comme aux producteurs. Elle nécessite d'être maîtrisée, pour que l'on évite de nouvelles émeutes de la faim et que l'on attire de nouveaux capitaux vers l'agriculture. L'essor des fluctuations des cours agricoles nécessite des actions coordonnées à l'échelle mondiale. On en est encore très loin aujourd'hui.

→ Pour la Science
Tentons d'envisager les mesures qui permettraient à la population mondiale en croissance de manger à sa faim. Pourra-t-on comme vous l'avez suggéré augmenter la productivité tout en respectant l'environnement et améliorer la gestion des ressources au plan mondial ?

→ Hervé Guéromard
Le défi est grand, pour ne pas dire immense. Avant d'aborder les pistes possibles, rappelons que le monde compte aujourd'hui 6,5 milliards d'habitants et qu'il en comptera plus de neuf milliards à l'horizon 2050. En outre, la croissance de la population aura essentiellement lieu au cours des deux prochaines décennies. C'est donc maintenant qu'il faut agir et trouver les solutions. Pour satisfaire les besoins alimentaires de la planète dans un cadre de développement durable, respectueux des hommes et de la nature, plusieurs leviers devront être simultanément actionnés : mettre en culture de nouvelles terres (à condition qu'elles ne soient pas prises sur les forêts et les espaces naturels), augmenter les rendements, réduire les pertes et les gaspillages ou encore réduire les consommations excessives de produits carnés de façon à libérer des surfaces pour les cultures.

→ Pour la Science
Y a-t-il de nouvelles terres à mettre en culture pour augmenter la production ?

→ Hervé Guéromard
Contrairement à une idée assez répandue, il existe des terres disponibles à mettre en culture sans réduction des forêts et des espaces naturels. Ces terres sont très inégalement réparties, quasi nulles en Asie du Sud, au Proche et Moyen-Orient, en Afrique du Nord ou dans l'Union européenne, nettement plus importantes en Amérique latine (Argentine, Bolivie, Brésil et Colombie) et en Afrique subsaharienne (Angola, République démocratique du Congo et Soudan). La mise en culture efficace de ces « réserves » se heurte néanmoins à plusieurs obstacles, liés à leur moindre fertilité intrinsèque, au manque d'eau, à la topographie parfois difficile (terres pentues ou isolées). C'est donc sur ces facteurs qu'il faut jouer en priorité, de façon à rendre l'exploitation de ces surfaces économiquement viable.

→ Pour la Science
Quels seront les rendements sur ces nouvelles terres cultivées ?

→ Hervé Guéromard
Durant les dernières décennies, c'est plus par la croissance des rendements que par la progression des terres cultivées qu'il a été possible d'augmenter la production agricole. Il en sera vraisemblablement de même demain. Les rendements sont aujourd'hui très hétérogènes, élevés dans l'Union européenne mais très faibles en Afrique subsaharienne ou au Proche- et Moyen-Orient. L'augmentation des rendements dans ces pays dans le cadre de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement est techniquement possible. Elle requiert de forts investissements dans la recherche, dans les infrastructures visant à assurer aux agriculteurs un accès accru à la mécanisation, à l'eau, aux engrais et aux produits de traitement des cultures. En aval, il faut améliorer les infrastructures de stockage et de transport avec un double objectif : faciliter l'accès à des marchés plus larges et réduire les pertes durant la récolte ou après. Afin de préserver au mieux les ressources naturelles, les systèmes se sont diversifiés et adaptés aux contraintes environnementales locales, et mis en œuvre en s'appuyant sur les savoirs et les savoir-faire des populations indigènes.



→ Pour la science

Que peut-on espérer économiser en améliorant le stockage ? Et plus généralement en réduisant les pertes et les gaspillages ?

→ Hervé Guyomard

Quelques chiffres pour donner une idée de l'ampleur des pertes et des gaspillages. Au début de ce siècle, les producteurs agricoles de la planète produisaient en moyenne 4 600 kilocalories par habitant et par jour. Sur ce total, environ 600 (soit 13 pour cent) étaient perdues durant la récolte ou juste après, les pertes à ce stade étant proportionnellement plus importantes dans les pays en développement que dans le monde développé. Les 4 000 kilocalories restantes étaient réparties entre l'alimentation des animaux (1 700 kilocalories, soit 42,5 pour cent) et l'alimentation humaine (2 300 kilocalories, soit 57,5 pour cent). Les 1 700 kilocalories végétales utilisées pour nourrir des animaux ne permettaient d'obtenir que 500 kilocalories d'origine animale sous forme d'œufs, de produits laitiers et de viande. Sur les 2 800 kilocalories végétales et animales disponibles pour l'alimentation humaine, 1 000 étaient encore perdues sous forme de pertes ou de gaspillages lors de la distribution et de la consommation finale, les proportions étant ici nettement plus importantes dans les pays développés que dans les pays en développement. D'après ce calcul, il sera possible, d'une part, de réduire les productions animales au profit des produits végétaux et, d'autre part, de lutter contre les pertes et les gaspillages.

Dans les pays en développement, réduire les pertes et les gaspillages suppose d'abord de lutter contre les ennemis des cultures et de développer les infrastructures de stockage et de transport. Dans les pays développés, les pertes et les gaspillages ont lieu plus loin dans la chaîne de production, lors de la distribution et de la consommation. Le succès – incertain – nécessite des changements dans les stratégies de distribution et les comportements de consommation. Quant à diminuer la consommation de produits animaux, soulignons simplement que cela nécessite d'accepter que l'augmentation du niveau de vie ne s'accompagne pas nécessairement

d'un accroissement des consommations d'huiles, de produits laitiers et de produits carnés au détriment des produits végétaux. Des lois, il est probable que des politiques publiques fortes, réglementaires, mais aussi incitatives, seront nécessaires pour réduire de façon notable les pertes et les gaspillages à la consommation, et pour limiter le port des produits animaux dans l'alimentation des populations riches.

→ Pour la science

Outre des recherches et les améliorations possibles de la production, reste la question que vous avez évoquée de la coordination internationale des ressources. Les spécialistes du climat ont réussi à coordonner leurs études, de sorte que les conclusions de leurs rapports sur le climat ont eu davantage d'écho que s'ils avaient été isolés. Peut-on envisager à l'image du GIEC, un groupement international de gestion de la ressource alimentaire, un GIGRA ?

→ Hervé Guyomard

Le monde est confronté à au moins trois défis sur le plan environnemental : le changement climatique et la limitation des émissions de gaz à effet de serre, la gestion quantitative et qualitative de la ressource en eau, et la préservation de la biodiversité. Dans les pays tempérés, un réchauffement climatique modéré augmenterait le rendement de la photosynthèse et donc la production agricole. Mais en Afrique subsaharienne, son impact sur l'offre serait vraisemblablement négatif. Et dans tous les pays, les risques d'accidents liés à une forte variabilité des températures et des précipitations seraient accrus. C'est parce que les dangers du réchauffement climatique sont d'ores et déjà visibles et que le phénomène est planétaire que les scientifiques sont parvenus à sensibiliser et mobiliser l'opinion publique et les gouvernements, avec toutefois des poches actives de résistance et des moyens sans nul doute encore insuffisants.

Dans le cas de l'agriculture et de l'alimentation, produire plus et mieux nécessitera des investissements importants, dans les pays du Nord comme dans ceux du Sud. Pour importants qu'ils soient, ces investis-

sements seront toutefois nettement plus faibles que les sommes aujourd'hui injectées pour enrayer la crise financière et bancaire. Une gouvernance mondiale de l'agriculture et de l'alimentation est nécessaire pour sécuriser les investissements requis sur la base de règles claires et acceptées de tous. Cette gouvernance mondiale aurait aussi pour mission de prévenir les situations de crise et si besoin – et besoin il y aura ! – d'en atténuer les effets par des actions coordonnées. Dans ce cadre, les scientifiques ont naturellement un rôle à jouer, à la fois en tant que viges mais aussi et surtout, pour proposer des solutions permettant d'augmenter la production agricole et de réduire les pertes, en d'autres termes en inventant les agricultures de demain qui seront nécessairement productives et écologiques.

Hélas, une telle gouvernance mondiale de l'alimentation et de l'agriculture n'existe pas aujourd'hui, malgré les efforts des scientifiques d'institutions telle la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) ou de nombreuses organisations non gouvernementales. L'enjeu est certes là, mais les pays sont différemment armés pour y faire face.

Ce texte est le résumé d'une conférence que Hervé Guyomard a donnée au Palais de la Découverte.

Hervé Guyomard est directeur scientifique à l'Institut national de la recherche agronomique. L'enregistrement de cette conférence est en ligne sur le site de France Culture :

www.radiofrance.fr/chaines/france-culture/nouveaux-programmes/naissance-dalacarte



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

HISTOIRE DES SCIENCES

Mary Anning et les débuts de la paléontologie anglaise

Vers 1810, une jeune Anglaise d'origine modeste, Mary Anning, exhume les restes de reptiles marins de l'ère mésozoïque. Elle contribue ainsi à l'essor de la paléontologie.

Alexis DUBANUS

Dans le monde de la paléontologie, le nom de Mary Anning est respecté comme celui d'une chasseuse de fossiles qui mit au jour, en 1812, le premier fossile d'ichthyosaure, un reptile marin contemporain des dinosaures. Au-delà de ce cercle, il demeure méconnu. Cette scientifique amateur, d'humble origine, occupe dans l'histoire de la paléontologie une place particulièrement seule femme dans une communauté scientifique masculine, elle figure parmi les pionniers de cette science en Europe.

Au début du XIX^e siècle, le blocus continental imposé par Napoléon au Royaume-Uni empêche ses habitants de voyager sur le continent. Ils redécouvrent alors le territoire national, et explorent son sous-sol. Les propriétaires fonciers prennent compte des immenses richesses que peuvent recéler leurs terrains. On se met à prospecter, à étudier la composition minéralogique des sols. La construction de ponts, de canaux contribue à faire découvrir la géologie et de nombreux amateurs s'y investissent.

Les strates fossilifères

Les couches rocheuses visibles permettent la mise au jour de fossiles étranges et insoupçonnés. Une nouvelle science s'organise : la stratigraphie, l'étude des strates de roches. Par exemple, le géologue allemand Alexander von Humboldt est le pre-

mier, en 1795, à définir les couches géologiques des calcaires du Jura, qui donneront leur nom au Jurassique, la deuxième période de l'ère mésozoïque. Ainsi, en cette période de plein essor, l'Europe de l'Ouest et du Nord fournit un climat et un cadre intellectuel particulièrement favorables au développement de la paléontologie.

En 1815, le géologue William Smith publie la première carte géologique de la Grande-Bretagne afin de rendre compte du contenu

AU XIX^e SIÈCLE, LES GÉOLOGUES

compréhendent que les fossiles permettent de distinguer les terrains et de les dater.

du sous-sol britannique. De père forgeron, il manque de formation académique, ce qui le dissuade pour faire reconnaître ses travaux. Mais Smith est l'un des premiers à comprendre que les fossiles permettent de distinguer des couches géologiques et de les dater. Sous son influence, la stratigraphie se développe.

De l'autre côté de la Manche, Georges Cuvier (1769-1832) et Alexandre Brongniart (1770-1847) parviennent aux mêmes conclusions grâce à leurs explorations du Bassin parisien : les fossiles ne sont pas seulement d'anciennes espèces vivantes disparues, mais de véritables marqueurs stratigraphiques. Cependant, la signification des fossiles est encore sujette à débat

pour une grande partie de la population. L'explication la plus commune leur attribue une origine diluvienne. Les fossiles seraient les restes de créatures ayant péri lors du Déluge biblique. Par la suite, ils auraient été enfouis au fur et à mesure que la croûte se reformait. Les œuvres d'art de l'époque expriment clairement le renouveau du thème du Déluge, par exemple chez John Martin (1789-1854).

L'une des personnalités de l'époque incarnant le mieux cette tradition est le médecin James Parkinson (1755-1828). Ce célèbre pour avoir donné son nom à une maladie neurologique, il est également paléontologue amateur et l'un des membres fondateurs de la Société géologique de Londres. En géologie, Parkinson est connu pour son livre *Restes organiques de l'Antiquité Moderne*, dont il a publié le premier volume en 1804. Richement illustré, cet ouvrage est ancré tout d'abord dans la science du passé. Il évoque par exemple les travaux du naturaliste suisse Johann Scheuchzer, datant du début du XVIII^e siècle. Mais l'ouvrage fait de nombreux adeptes, parmi lesquels Gideon Mantell (1790-1852). Ce médecin mène lui aussi une activité de paléontologie. Il est l'un des premiers scientifiques à exhumer un dinosaure sur le sol britannique.

Une autre grande personnalité de la géologie britannique est le révérend William Buckland (1784-1856). Passionné par les fossiles depuis l'enfance, il se situe à mi-chemin entre une tradition religieuse appuyée sur les écritures bibliques et un sou-



Kevin Walsh, Oxford University Museum of Natural History

rant moderniste tenant compte des dernières avancées de la science. Son objectif est d'allier la science et la religion, deux pôles de la connaissance qui sont, selon lui, complémentaires. La géologie est une science reine grâce à laquelle on peut étudier la signature de Dieu.

Toutes ces théories contradictoires ont le mérite de développer une nouvelle conception de l'histoire de la Terre. Elle est fondée sur la supposition que le temps nécessaire à l'apparition des espèces est extrêmement long. Les travaux des pionniers de la géologie préparent ainsi le terrain aux découvertes de la jeune Mary Anning.

Née en 1799 à *Lyme Regis*, un village portuaire du Sud-Ouest de l'Angleterre, dans le Dorset, la jeune fille a grandi dans un univers particulièrement propice aux prospections géologiques. À l'époque, l'endroit est déjà célèbre pour ses falaises, faites d'une ardo-

nance de grandes calcaires et de couches argilo-schisteuses. Nommée *Lias bleu* (voir la figure 2), cette séquence géologique remonte à la fin du Trias et aux premiers âges du Jurassique, entre 210 et 195 millions d'années. Le Lias est l'ancien nom du début du Jurassique. Les sédiments exclusivement marins recèlent entre autres des ammonites, mais aussi, beaucoup plus rares, des fossiles de reptiles gigantesques.

Premières fouilles et découvertes

Fabricant de meubles peu aisé, Richard, le père de Mary, collecte des fossiles pour les vendre accompagné de sa fille. La jeune fille apprend ainsi les rudiments de la paléontologie. Mais en 1810, Richard fait une chute mortelle, laissant sa famille dans une situation financière catastrophique. Ce décès

1. DORSET ANTIQUOR (un Dorset plus ancien), dessiné en couleurs du géologue Henry de la Beche, représente une vision imaginaire de l'ère mésozoïque inspirée par les découvertes de Mary Anning. On y voit, au centre, un ichthyosaure attaque un plesiosaure. Ci-dessus le squelette du *Plesiosaurus macrocephalus* découvert en 1820 par Mary Anning, d'après le dessin de William Buckland.

L'AUTEUR



Alexis DRAHOS est docteur en histoire de l'art à l'Université Paris IV Sorbonne.

✓ SUR LE WEB

<http://www.lymeregis-museum.co.uk/>

<http://www.discovering-fossils.co.uk/>

<http://www.soton.ac.uk/~imw/liafos.htm>

n'entrave pas, cependant, la détermination de Mary à poursuivre ses recherches dans les falaises du Dorset. Et cette volonté ne tarde pas à être récompensée.

En 1811, son frère Joseph découvre un crâne énigmatique. L'année suivante, la jeune fille exhume une étrange créature dont il ne reste que la colonne vertébrale. La découverte fait grand bruit. La pièce est vendue pour 23 livres, somme suffisante pour nourrir la famille durant plusieurs mois. Les ossements fossiles sont ensuite exposés au *Buck's Museum* de Piccadilly, au centre de Londres.

Le spécimen déconcerte les savants. Ils le voient comme une sorte de crocodile. Mais les connaissances de l'époque ne semblent pas pouvoir expliquer l'étrange anatomie de l'animal. Alors que la nouvelle se répand dans les cercles savants londoniens, William Buckland rend visite à la jeune femme. Il cherche à comprendre le fossile en utilisant la méthode de l'anatomie comparée prônée par Cuvier, autorité européenne en matière de fossiles.

Trois ans plus tard, cet intérêt se renforce lors de la reprise des communications entre les deux pays suite à la chute de l'Empire napoléonien. Buckland établit une correspondance avec le paléontologue français. Celui-ci profite de la paix retrouvée pour visiter l'*Ashmolean Museum* d'art et d'archéologie, à Oxford, en 1818.

Finalement, le mystérieux reptile est décrit et nommé *Ichthyosaurus*, soit lézard-poisson, par le naturaliste d'origine allemande Charles Konig, en 1817. Quatre ans plus tard, deux géologues britanniques, William Conybeare et Henry de la Beche, lui-même originaire de *Lyme Regis*, confirment cette conclusion en s'inspirant de la méthode de Cuvier. Ils constatent que les dents de l'animal ressemblent à celles d'un crocodile. Néanmoins le nombre de dents, la forme de la mâchoire, beaucoup plus allongée chez le spécimen, et la forme des vertèbres constituent des différences frappantes. L'animal n'est bien un reptile, mais il est doté de traits de poisson.

De la difficulté d'être femme

Bien que la jeune Mary Anning n'ait pas été citée à l'époque pour cette découverte retentissante, la situation de sa famille s'améliore quelque peu grâce à l'aide d'un certain Thomas Birch, colonel et riche collectionneur de fossiles. Outré par la pauvreté de cette famille, il met sa collection aux enchères et lui reverse les bénéfices. Heureusement, car tout semble se liguer contre la jeune femme : ses modestes conditions sociales, les tendances religieuses de son défunt père, qui s'opposaient à l'Église anglicane, et, bien sûr, son sexe : les femmes sont alors subordonnées aux hommes dans tous les aspects de la vie quotidienne ; elles n'ont pas le droit au vote, d'aller à l'université ou encore d'exercer des fonctions publiques. Mary Anning ne sort pas du rang, même si ses découvertes lui permettent d'avoir une certaine notoriété dans le monde scientifique.

Toutefois, le début de la décennie 1820 s'avère fructueux. Après avoir mis au jour, en 1821, deux nouveaux restes d'ichthyosaures nommés respectivement *Ichthyosaurus platyodon* et *Ichthyosaurus vulgaris*, la jeune femme trouve un nouveau spécimen qui suscite de grandes interrogations.

Le fossile montre un cou d'une longueur inhabituelle. Vendu au colonel Birch, il est étudié par Conybeare, qui assure que l'espèce n'est pas un canular. Il la nomme *Plesiosaurus*, soit « proie d'amphibien ». Selon



Michael Maggs

2. LE LIAS BLEU EST UNE FORMATION GÉOLOGIQUE visible à *Lyme Regis* dans laquelle alternent des bancs calcaires et des couches argileuses. Très riche en fossiles, notamment en ammonites, elle remonte à la fin du Trias et aux premiers âges du Jurassique.

lui, cette espèce d'origine marine côtoyait les ichthyosaures et a formé un chaînon manquant entre les reptiles marins et les crocodiles. Comme Buckland et bien d'autres, Cuvier croyait que les espèces forment une chaîne connectée d'organismes vivants créés par Dieu.

La valeur de la découverte du plésiosaure, une fois révélée, semble établir définitivement la réputation de chasseuse de fossiles qu'a acquise Mary Anning dans le monde scientifique. En 1828, elle découvre un ptérodactyle (ou ptérosaure), un reptile volant nommé *Dimorphodon*. Deux ans plus tard, en décembre 1830, elle fait sa dernière grande découverte en exhumant un nouveau plésiosaure.

Ce spécimen est acheté l'année suivante par un aristocrate, William Willoughby, pour la somme remarquable de 210 livres. L'espèce sera baptisée *Plesiosaurus macrocephalus* qu'en 1836 par Buckland, puis elle sera décrite en 1840 par l'anatomiste Richard Owen. Outre ses découvertes de grands vertébrés marins, la paléontologue se distingue aussi pour les invertébrés qu'elle trouve dans les falaises de *Lyme Regis*, tels les ammonites.

En 1830, de la Beche représente sous la forme d'un dessin en couleurs les découvertes de Mary Anning. Nommé *Duria Antiquior* (« Un Dorset plus ancien »), il met en scène des ptérodactyles ainsi qu'un plésiosaure aux prises avec un ichthyosaure (voir la figure 1). Des lithographies en sont tirées pour être vendues au bénéfice de Mary Anning.

L'imaginaire romantique

Ce dessin illustre à quel point ces nouveaux reptiles préhistoriques enflamment l'imaginaire des paléontologues, et sans doute aussi du public. La tentative de dépeindre les écosystèmes que fréquentaient les animaux des temps antédiluviens commence à être dans l'air du temps. En témoignent, par exemple, les scènes où John Martin représente des crocodiles (le grand groupe de reptiles de l'ère mésozoïque), des ichthyosaures ou des plésiosaures au milieu d'une végétation luxuriante. Ses reptiles géants d'ailleurs

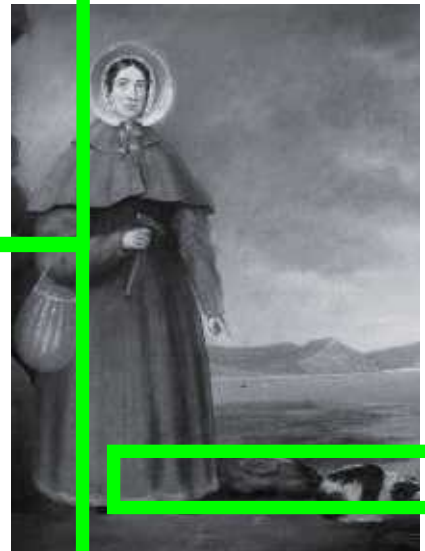
parfaitement à l'imaginaire romantique.

En 1828, alors que ses grandes découvertes sont derrière elle, la paléontologue reçoit une rente de 25 livres annuelles, ce qui lui permet d'échapper définitivement à la précarité. Atteinte d'un cancer, en 1845, elle reçoit une nouvelle aide de la communauté scientifique. À sa mort le 9 mars 1847 ses pairs lui rendent hommage. De la Beche lui consacre un article dans le *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, en 1848.

Toutefois, par la suite, ses contributions à la paléontologie seront quelque peu occultées dans le milieu des paléontologues. Elle y reste connue comme une découvreuse de fossiles d'un très grand intérêt ; mais elle n'a jamais publié d'article scientifique, et elle n'est donc pas placée sur le même rang que d'autres géologues de son temps. Les femmes, par ailleurs, ne seront admises au sein de la Société de géologie britannique qu'en 1904. En revanche, dans la mémoire collective, le souvenir de Mary Anning reste vif, en raison de ses spectaculaires découvertes de terrain. Ainsi, au siècle suivant, l'illustrateur Charles Edmund Brock (1870-1938) représente, dans le livre d'Arthur Mee *L'encyclopédie des enfants*, la jeune adolescente sur le point d'exhumer son fameux ichthyosaure.

En 1999, à l'occasion du bicentenaire de sa naissance, des paléontologues et des géologues internationaux se sont rassemblés à *Lyme Regis* pour honorer la mémoire d'une femme au destin hors du commun. En 2001, dans son livre *The Dragons Seekers* (les chasseurs de dragons), le paléontologue Christopher McGowan, du Musée royal de l'Ontario, rappelle que des ichthyosaures sont encore aujourd'hui exhumés dans les falaises de *Lyme Regis*, aux endroits même que Mary Anning fouillait voilà quelque 200 ans.

Rétrospectivement, les historiens estiment que ces découvertes ont contribué à forger l'idée d'une profondeur des temps géologiques. Avec la paléontologie, l'homme devient en mesure de voyager dans le temps et de découvrir des faunes inconnues. Le mérite de Mary Anning est d'avoir été l'un des pionniers de cette aventure malgré des conditions de vie particulièrement difficiles et sa qualité de femme.



Portrait de Mary Anning (1799-1847), par le peintre B.J. Bonne.

✓ BIBLIOGRAPHIE

M.J.S. Rudwick, *Bursting the limits of time : The reconstruction of geohistory in the age of revolution*, The University of Chicago Press, 2002.

P. Pearce, *Jurassic Mary. Mary Anning and the primeval monsters*, Sutton Publishing, 2006.

F. Duranthon, *Histoire de dinosaures*, Brest, 2004.

P. Taquet, *Quand les reptiles marins anglais traversaient la Manche*, *Ann. Paléontologie*, vol. 89, pp. 22-64, 2003.

C. McGowan, *The dragon seekers*, Pegasus Publishing, 2001.

Y. Gayraud-Volant et H. Thomas, *Les fossiles : empreinte des mondes disparus*, Gallimard-Jeunesse, 2000.

E. Buffetaut, *Histoire de la paléontologie. Que Sais-je ?*, PUF, 1998.

LOGIQUE & CALCUL

La répartition idéale des biens existe-t-elle ?

Différents objectifs et différentes méthodes sont utilisables pour répartir des biens ou des ressources : ils conduisent à des résultats incompatibles.

Jean-Paul DELAHAYE et Philippe MATHIEU

L'histoire de la modélisation dans les sciences humaines et en particulier en économie conduit presque invariablement à une double conclusion. 1) Il est très difficile de faire des modèles précis et exacts ; quand vous essayez, une bonne âme vous explique que vous êtes naïf en pensant représenter le réel avec la méthode retenue. 2) Concevoir des modèles et les étudier est important : on dégage des idées, on rend possibles des théorèmes et des programmes qui renforcent la compréhension et aident à prendre de meilleures décisions.

Le partage des richesses

Le partage des ressources entre les membres d'une communauté est un éternel problème humain, souvent très mal résolu. L'humanité ne connaît pas bien le but qu'elle poursuit et veut concilier des objectifs contradictoires.

Ce problème se pose quand il faut répartir les richesses disponibles entre les agents économiques, entre individus, entre groupes sociaux, entre entreprises ou institutions concurrentes, etc., mais aussi quand on doit décider comment attribuer le temps de parole, partager l'eau, l'électricité, les recettes fiscales, ou les moyens techniques entre diverses entités qui attendent chacune leur part. Améliorer l'efficacité d'un algorithme ou d'un réseau d'ordinateurs se ramène aussi bien souvent à répartir des ressources. Ce qui explique que, venant en renfort aux

économistes et aux mathématiciens, les informaticiens étudient aujourd'hui ces questions. Examinons le problème sur un exemple simple et considérons deux entités (deux « agents ») qui doivent se partager divers biens (supposés insécables) auxquels elles accordent plus ou moins de valeur. Les agents seront notés *A* et *B*. Les biens seront notés *a*, *b*, *c* et *d*. Nous supposons qu'il n'y a qu'un exemplaire de chaque bien.

Que souhaitez-vous ?

L'agent *A* attribue autant d'importance au bien *a* qu'au bien *b* (utilité 10), et moins aux deux autres (utilité *c* = 3, utilité *d* = 1). L'utilité d'un bien, l'intérêt qu'on éprouve pour le bien, est ici toujours mesurée par un entier positif. Les utilités pour l'agent *B* des biens *a*, *b*, *c* et *d* sont respectivement de 2, 3, 2, et 2.

Utilités	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Agent <i>A</i>	10	10	3	1
Agent <i>B</i>	2	3	2	2

Bien sûr, on pourra envisager d'autres exemples avec plus de deux agents et plus de quatre biens à répartir, chacun pouvant aussi exister en plusieurs exemplaires.

Pour simplifier, imaginons dans un premier temps qu'un monarque absolu décide de l'attribution des biens. Comment doit-il les distribuer au mieux ? Posez-vous la question quelques secondes, avant de lire la suite.

Votre réponse est, sans doute, la meilleure allocation des biens aux agents dépend du but que le monarque poursuit. S'il veut que, globalement, la « société »

de ses deux sujets soit la plus satisfaite (recherche du bien-être social maximum), il doit trouver l'allocation des ressources qui conduise à une somme maximale d'utilités. Pour chaque allocation possible, la satisfaction d'un agent est la somme des utilités (comparées avec ses valeurs) pour les biens qui lui sont attribués. La meilleure allocation maximalise la somme des satisfactions des deux agents : *max-som*.

Rien ne dit que le but du monarque soit cette maximisation globale du total des satisfactions (point de vue *utilitariste*). Le monarque soucieux de ne pas trop défavoriser un agent, peut rechercher l'allocation qui donne la plus grande valeur possible à la satisfaction de l'agent le moins bien servi : il cherche à maximiser le minimum des satisfactions de *A* et de *B* : *max-min*. Le point de vue *égalitariste* évite qu'un agent soit trop mécontent. Notons cependant que cela peut être catastrophique et se faire aux dépens de l'utilité globale. Il faut choisir !

Ce choix est un problème moral et politique, pas mathématique. Hélas, l'intérêt général (utilitarisme) ne coïncide que rarement avec l'intérêt du plus pauvre (égalitarisme) comme nous le verrons plus loin.

Présentons aussi une troisième conception nommée *élitiste*. Pour l'élitiste, ce qui compte c'est que le plus satisfait ait la satisfaction la plus grande possible : *max-max*. L'idée se défend si, par exemple, diverses entités composées de plusieurs agents doivent s'affronter et que chaque entité est représentée par le « champion » du groupe. L'intérêt du monarque sera de sélectionner

LE JUGEMENT DE SALOMON



Salomon, nouveau roi des Hébreux, reçoit en songe un message de l'Éternel : « Demande ce que tu veux, et je te le donnerai. » Salomon répond : « Accorde donc à ton serviteur un cœur intelligent pour juger ton peuple, pour discerner le bien du mal ! »

Peu de temps après, se présentent devant lui deux prostituées. La première raconte les faits suivants : elles vivent ensemble, seules dans une maison et ont accouché à peu d'intervalle chacune d'un fils. Or, toujours d'après son récit, l'autre femme a enlevé son enfant, car « elle s'était couchée sur lui ». Puis, elle aurait interverti les deux enfants afin de conserver pour elle l'enfant vivant.

Et les voilà demandant justice à Salomon, chacune accusant l'autre d'être la mère du mort et réclamant pour elle l'enfant vivant. On connaît le verdict de Salomon : « Coupez en deux l'enfant qui vit, et donnez-en la moitié à l'une et la moitié à l'autre. » La première femme, craignant de ne plus être pour qu'au moins son enfant vive : « Mon seigneur, donnez-lui l'enfant qui vit et ne le faites point mourir. »

Qu'en disent les mathématiques du problème ?

Une des deux mères, A , alloue 20 points à l'enfant vivant avec elle, 6 points pour l'attribution de l'enfant à la mère B , et 5 points pour la moi-

tié de l'enfant coupé en deux. L'autre mère, B , attribue 13 points à l'enfant vivant avec elle, 0 point pour l'attribution de l'enfant à la mère A et 4 points à la moitié de l'enfant coupé en deux.

Le jugement utilitariste favorisant la somme des allocations des deux agents donne l'enfant à la mère A , la somme des allocations étant égale à 20. Le jugement égalitariste, qui recherche l'allocation donnant la plus grande valeur possible à la mère la moins bien servie, c'est-à-dire 4, amènerait Salomon à ordonner la coupe de l'enfant en deux...

La loi de distribution de biens est affaire de choix : ici l'égalitarisme n'indique pas la solution satisfaisante.

LES AUTEURS



Jean-Paul ELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).
Philippe MATHIEU est professeur à l'Université de Lille et directeur de l'équipe Systèmes multi-agents et comportements (SMAC du LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

Kenneth Arrow, *Social Choice and Individual Values*, Yale University Press, 1963.

Ulrich Endrès, Nicolas Maudet, Fariba Sadri et Francesca Toni, *Negotiating socially optimal allocations of resources*, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 25, 315-341, 2006.

Silvia Estiva, Yann Chevalere, Ulrich Endrès et Nicolas Maudet, *How equitable is rational negotiation?*, *AAMAS'06*, 866-873, Japan, Hakodate, ACM Press, 2006.

Tuomas Sandholm, *Contract types for satisficing task allocation: theoretical results*, *AAAI Spring Symposium: Satisficing Models*, USA, California, Stanford University, 23-25, 1998.

Antoine Noggaillard, Philippe Mathieu et Brigitte Jaumard, *A multi-agent resource negotiation for the utilitarian welfare*, *ESAW'08 [Engineering Societies in the Agents World]*, et LNAI 5485, Springer-Verlag, 2008.

les richesses sur un seul agent, celui qui est le plus apte à représenter le groupe.

Un autre point de vue encore est celui qui opère un compromis entre les trois points de vue précédents. On l'appelle le point de vue *nashien*, du nom du mathématicien économiste John Nash.

Le point de vue nashien est que la meilleure allocation maximise le produit des satisfactions des agents : *max-pro*. Pour que ce produit soit grand, il ne faut pas que certains agents ne reçoivent rien (car, si un facteur est nul, le produit l'est aussi), mais aussi qu'une certaine équité soit assurée (par exemple, quand la somme s de deux nombres a et b est fixée, le maximum du produit ab est atteint pour $a = b = s/2$). Le point de vue nashien conduit à une allocation équilibrant à peu près les satisfactions des divers agents et assure que le total des satisfactions reste élevé.

Quatre allocations optimales différentes

Pour voir que les quatre objectifs possibles d'un monarque ne conduisent pas à la même allocation optimale, examinons notre exemple... que nous avons choisi pour prouver que les quatre objectifs possibles sont tous différents.

Utilités	a	b	c	d
A	10	10	3	1
B		3	2	2

Pour obtenir la meilleure allocation correspondant au point de vue utilitariste, on donne chaque bien à celui qui y accorde le plus d'importance et donc A se voit attribuer les biens a et b et c et B récupère d . La satisfaction de A est $10+10+3$, celle de B est 2 et donc le total, le bien-être social, vaut 25. On ne peut pas faire mieux et cette allocation optimale se note :

$\{A \{23\} : a, b, c ; B \{2\} : d\} \text{ max-som} = 25$.

Bien sûr, B se sentira mal aimé. Un monarque égalitariste et donc soucieux de faire que le moins bien loti de ses sujets reçoive le plus possible donnera le bien a à A (qui aura donc 10) et les biens b, c, d à B (qui aura donc 7). Il est impossible de faire mieux que 7 pour le minimum des agents, car pour que B ait plus que 7, il faudrait tout lui don-

ner et A se retrouverait avec 0. L'allocation égalitariste optimale est :

$\{A \{11\} : a ; B \{7\} : b, c, d\} \text{ max-min} = 7$.

Le point de vue égalitariste est de 8 utilités. En effet, au lieu d'avoir un total de 25 utilités, la communauté des deux agents A et B dispose d'un total de seulement 11 utilités. Le point de vue utilitariste ne coïncide pas avec le point de vue égalitariste, c'est décevant, et mieux vaut en avoir conscience. Malheureusement, ce n'est pas tout : le point de vue élitiste, lui encore, produit une allocation optimale différente. Il faut tout donner à A et rien à B. Il est évident que c'est la meilleure allocation pour l'élitiste car pour maximiser ce que le meilleur possède, il faut tout lui donner. Comme ici, il est plus rentable de tout donner à A qui en tire une utilité totale de 24 que de tout donner à B qui n'en aurait tiré qu'une utilité totale de 9. Le mieux est que A prenne tout. Le monarque élitiste opte donc pour :

$\{A \{24\} : a, b, c, d ; B \{0\} : \text{rien}\} \text{ max-max} = 24$.

Remarque que, là encore, le choix élitiste engendre un coût pour la communauté formée par A et B : globalement, elle n'obtient que 24 utilités alors que 25 est possible.

Pour le point de vue nashien, la meilleure allocation est de donner les biens a et b à A et c et d à B, ce qui engendre une satisfaction de 20 pour A et de 4 pour B, et donc un produit des satisfactions de 80. On ne peut pas faire mieux pour le produit. L'allocation optimale pour le nashien est donc encore différente des trois précédentes :

$\{A \{20\} : a, b ; B \{4\} : c, d\} \text{ max-pro} = 80$.

Selon l'objectif que le monarque se fixe, quatre répartitions différentes sont les meilleures allocations ! Pour résoudre un problème d'allocation, il est nécessaire d'avoir analysé ce qu'on croit le meilleur objectif pour la communauté concernée ! Cette leçon morale et politique mériterait d'être connue de tout citoyen, car elle montre qu'il n'y a pas qu'une seule conception possible de l'intérêt général, mais plusieurs, et qu'un compromis est inévitable. La question de savoir si le point de vue nashien est le bon compromis admet probablement une réponse négative, car d'autres compromis sont envisageables, et mathématisables, conduisant à d'autres solutions optimales.

Complications

S'il y a n agents et m biens à répartir, le nombre d'allocations possibles est n^m , ce qui est vite énorme. Pour 100 biens et 10 agents, cela fait 10^{100} , ce qu'on ne peut pas traiter en envisageant chaque cas : les plus gros calculs informatiques faisables aujourd'hui comportent de l'ordre de 10^{24} opérations. On utilise donc des méthodes mathématiques plus subtiles. Pour le point de vue utilitariste et le point de vue élitiste, on connaît d'excellents algorithmes rapides ; pour le point de vue égalitariste, cela devient plus difficile, et pour le point de vue nashien, on est très rapidement dans l'impossibilité de calculer en temps raisonnable la solution optimale et on doit donc se contenter de solutions approchées.

D'autres difficultés sont plus profondes et plus graves : elles naissent de l'hypothèse qu'un monarque puisse être parfaitement informé et puisse décider des attributions de chacun.

Pour rendre le modèle plus réaliste, il faut le reformuler en prenant en compte deux éléments. D'une part (a), le fait que les biens au début sont déjà dans les mains de certains agents, peut-être mal répartis, mais d'une façon qu'il faut prendre en compte. D'autre part (b), que tous les échanges ne sont pas intéressants pour les agents qui, sauf cas particuliers, ne souhaitent pas y perdre quand évoluera l'allocation initiale.

Quels échanges peuvent souhaiter faire des agents détenteurs de biens ? Avec ces échanges acceptables, les agents réussiront-ils à construire une allocation intéressante selon un des points de vue utilitariste, égalitariste, élitiste ou nashien ?

Ne pas y perdre

Lors d'un échange de biens, personne ne souhaite perdre. Si tous les agents attribuaient les mêmes valeurs aux biens, aucun échange ne serait possible, car ce que l'un gagnerait serait perdu par l'autre. Quand les agents n'accordent pas les mêmes valeurs aux différents biens, certains échanges sont gagnants pour les deux agents.

Si j'ai des pommes et que je les aime moins que les poires, et si vous avez des

ÉCHANGES RATIONNELS ET SUITE D'ÉCHANGES



Un marché du troc au Pérou

Un échange de biens entre l'agent A et l'agent B est rationnel (l'agent A donne ses biens à B et B donne ses biens à A) si A y gagne (sa satisfaction est plus élevée après l'échange) et si B y gagne.

Considérons les biens a, b, c, d, e, f et les agents A, B, C qui y attribuent les valeurs (utilités) suivantes :

Utilités	a	b	c	d	e	f
agent A	1	2	3	9	1	1
agent B	2	1	1	2	3	5
agent C	3	4	1	1	5	2

$\{A(10): a, d; B(4): b, e; C(4): c, f\}$ $\text{som} = 18$. Voici la liste complète des échanges rationnels :

• A donne a à B et B donne b à A . La satisfaction de A passe de 10 à 11, celle de B passe de 4 à 5.

• A donne a à C et C donne c à A . La satisfaction de A passe de 10 à 12, celle de C passe de 4 à 6.

• B donne e à C et C donne f à B . La satisfaction de B passe de 4 à 5, celle de C passe de 4 à 6.

Parmi les suites d'échanges rationnels, il y a les deux suivantes :

Suite d'échanges rationnels 1 : A donne a à B et B donne b à A .

Suite d'échanges rationnels 2 : B donne e à C et C donne f à B .

Cette suite conduit à l'allocation :

$\{A(11): b, d; B(5): c, e; C(6): a, f\}$ $\text{som} = 24$.

Suite d'échanges rationnels 2 :

$[B$ donne e à C et C donne f à $B]$

$[A$ donne a à C et C donne c à $A]$.

Cette suite conduit à l'allocation :

$\{A(12): c, d; B(5): b, e; C(6): a, f\}$ $\text{som} = 26$.

Chacune de ses deux allocations finales est telle que plus aucun échange rationnel ne peut se produire (marché bloqué).

On tire de cet exemple deux conclusions.

— Une séquence d'échanges rationnels peut conduire à une allocation bloquée qui n'est pas la meilleure de celles accessibles par des suites d'échanges rationnels (c'est ce qui se passe dans le cas de la suite d'échanges 1) :

laisser libre le marché ne donne pas nécessairement l'allocation optimale que le marché pourrait atteindre et l'issue des échanges dépend du hasard.

Dans notre exemple, le problème est lié à l'ordre des échanges.

Si A échange avec B et B échange avec C , il ne pourra plus échanger avec C , alors que cela aurait été plus profitable.

La suite d'échanges rationnels qui donne le meilleur résultat possible est la suite d'échanges 2 qui conduit à une allocation dont la somme des utilités est 26. Ce n'est pas l'allocation utilitariste optimale qui ici serait :

$\{A(5): b, c; B(5): f; C(18): a, d, e\}$ $\text{som} = 28$.

L'allocation optimale utilitariste est inaccessible si on s'impose de n'opérer que des échanges rationnels. Se restreindre à des échanges rationnels interdit donc dans certains cas d'arriver à la meilleure allocation, et remet au hasard l'accès à la meilleure allocation accessible qui peut se trouver exclue elle-même.

Un marché bloqué est un état où plus aucun échange rationnel n'est possible.

Un marché bloqué n'est pas nécessairement une allocation optimale.

Un marché bloqué peut être une allocation optimale.

Un marché bloqué peut être une allocation sous-optimale.

Un marché bloqué peut être une allocation optimale.

Un marché bloqué peut être une allocation optimale.

Échanges multiples

L'exemple suivant (où l'on adopte le point de vue utilitariste) montre que si le réseau des relations entre agents est incomplet, il peut devenir impossible d'atteindre l'allocation optimale uniquement en faisant des dons sociaux (lorsque le réseau est complet, les dons sociaux conduisent toujours à l'allocation optimale). L'exemple montre aussi qu'en autorisant des échanges multiples, on peut atteindre l'allocation optimale, alors qu'avec des échanges simples, on ne peut pas.

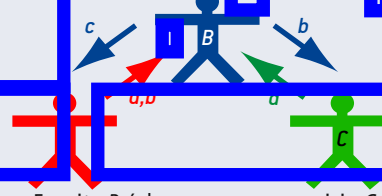
On suppose que les agents A , B et C disposent selon le schéma : $A \leftrightarrow B \leftrightarrow C$. Les biens sont a , b , c , d et les agents y attribuent les valeurs suivantes :

Utilités
Agent A : $a(8)$, $b(15)$, $c(9)$, $d(10)$
Agent B : $a(6)$, $b(11)$, $c(5)$, $d(4)$
Agent C : $a(10)$, $b(4)$, $c(8)$, $d(1)$
On suppose que les agents A , B et C sont rationnels (chaque contractant y gagne), cette allocation optimale est atteinte en deux échanges. L'allocation optimale est :
 $\{A(9) : a, b; B(15) : a, d; C(10) : b\}$ $som = 34$
À partir de la situation de départ, même si les agents A , B et C ne font que des échanges simples, on ne peut pas atteindre l'allocation optimale, car A ne peut pas donner b (qui vaut 6 pour lui) à B (pour qui b vaut 11).

En revanche, si les agents opèrent des échanges multiples (plusieurs biens contre un seul), et même en n'acceptant que des échanges

rationnels (chaque contractant y gagne), cette allocation optimale est atteinte en deux échanges. L'allocation optimale est :
 $\{A(9) : a, b; B(11) : a, b; C(2) : d\}$ $som = 22$.

Ensuite B échange, avec son voisin C , b contre d (B y gagne 4, C y gagne 8), ce qui conduit à l'optimum.



poires et que vous les aimez moins que les pommes, alors nous serons gagnants en échangeant. Tout le monde peut être gagnant dans un échange, et c'est bien pour cela qu'il y en a depuis la nuit des temps.

Un échange entre un agent A et un agent B est qualifié de *rationnel* si, comme dans l'exemple des pommes et des poires, chacun y trouve son compte. Aucune autorité régulatrice n'est nécessaire, car chacun en tire un bénéfice. Notons aussi que pour pratiquer un tel échange, chaque agent n'a besoin que de connaître ses propres utilités, aucune information globale centralisée n'est nécessaire.

Le problème économique de l'allocation, grâce à cette notion d'échange rationnel, peut mieux coller à la réalité. Partant d'une attribution de biens entre agents (fixée par les événements passés dont on ne remet pas en cause le résultat), est-il possible en opérant une suite d'échanges rationnels d'arriver à une allocation des ressources qui soit conforme au point de vue utilitariste (ou égalitariste, etc.) ? Si ce n'est pas possible, quelle est la suite d'échanges rationnels qui permet d'en approcher le plus ? Comment calculer ces suites optimales d'échanges ?

Le même problème peut être posé en imaginant des agents qui n'opèrent pas les échanges à deux, mais en se regroupant à trois ou plus. On peut aussi imaginer et étudier des agents altruistes qui acceptent, conscient que c'est l'intérêt général, d'opérer des échanges qui leur soient temporairement défavorables ou partiellement défavorables. Il est intéressant par exemple d'étudier des agents qui acceptent des échanges où ils sont perdants à la condition que glo-

balement le bien-être social augmente. Si un agent A possède un bien qui pour lui vaut 5, le donne à un agent B pour qui le bien vaut 6, cela augmentera la valeur cumulée des utilités de 1 (et donc le bien-être social tel que le conçoit un utilitariste). Les échanges, où même si un des contractants est perdant, qui augmentent le bien-être social sont dénommés *échanges sociaux*. Lorsque l'échange se réduit au passage d'un seul bien d'un agent à un autre, on parle de *don social*.

Indispensables dons sociaux

Les problèmes plus réalistes qui n'envisagent que des échanges rationnels, ou que des échanges sociaux, conduisent à des leçons intéressantes. Voici quelques-uns des résultats obtenus.

— Comme on s'y attendait, en partant d'une répartition quelconque et en n'envisageant que des échanges rationnels (à deux ou même à plus de deux), il sera rare d'arriver à la meilleure allocation utilitariste ou même conforme à un des autres points de vue. La raison en est très simple : si l'un des agents détient au départ beaucoup de biens, il n'acceptera pas de s'en séparer pour aller vers une allocation qui satisfasse un point de vue collectif (quel qu'il soit). Avec les données de notre exemple, si, au départ, tous les biens sont dans les mains de A , aucun échange rationnel ne sera possible, et on restera dans la situation initiale qui n'est une bonne allocation selon aucun des quatre points de vue considérés. Une société d'agents qui n'acceptent de procéder qu'à des échanges rationnels, une

forme d'égoïsme, se condamne à ne pas atteindre une bonne satisfaction générale, et cela quel que soit le point de vue utilitariste, égalitariste, élitiste ou nashien.

— En revanche, quelle que soit l'allocation initiale, il existe une suite de dons sociaux qui conduit à l'allocation optimale pour le point de vue utilitariste. L'idée de la démonstration est que chaque agent qui détient un bien dont l'utilité pour lui est inférieure à l'utilité pour un autre agent le lui donne. Chaque don de ce type améliore le total des satisfactions, et cette suite de dons sociaux ne s'arrête que lorsque chaque bien est dans les mains de celui pour lequel l'utilité du bien est la plus grande. Toute suite de tels dons sociaux sera finie et aboutira à l'allocation optimale utilitariste.

On a là une situation intéressante, où les agents, pourvu qu'ils acceptent d'opérer des dons sociaux, vont vers la solution optimale utilitariste et cela sans contrôle centralisé des échanges. La conclusion est ici très morale : sans dons sociaux, si chacun n'accepte que de faire des échanges rationnels, alors l'allocation optimale utilitariste est le plus souvent inaccessible, alors que si chacun pratique le don social, on arrive à cette allocation optimale. En redéfinissant la notion de don social pour l'adapter aux autres points de vue, on a des résultats analogues.

— Sur un plan algorithmique, le calcul des séquences d'échanges rationnels conduisant à l'allocation la meilleure selon tel ou tel point de vue est plus compliqué que le simple calcul de l'allocation optimale : il faut considérer une grande variété de suites d'échanges rationnels, certaines d'entre elles conduisant à des impasses, c'est-à-dire à des allocations non optimales qu'on ne peut plus faire évoluer, voir l'encadré de la page 91. Un problème délicat aussi est celui de la décision d'arrêt : quand et comment les agents sont-ils informés qu'ils ont fait assez de transactions et qu'ils peuvent s'arrêter ? Diverses variantes du problème ont été examinées et des algorithmes ont été élaborés pour calculer efficacement les bonnes séquences d'échanges rationnels ou autres.

Ces modèles de la recherche des séries optimales d'échanges rationnels, comme toute modélisation mathématique en sciences humaines, ne sont pas jugés assez réalistes. Dans le cas des échanges rationnels, ils présentent au moins deux défauts majeurs.

— S'il existe une suite d'échanges (conduisant par exemple à la meilleure allocation utilitariste accessible), comment les agents peuvent-ils le savoir à moins de disposer chacun d'une source parfaite d'information et d'une bonne capacité de calcul ? Dans la réalité, les agents sont partiellement informés et ils font les échanges (rationnels ou non) en ne prenant en compte que ce qu'ils savent et bien souvent en préférant mener

les échanges les meilleurs pour eux dans l'immédiat, même si cela les conduit dans l'impasse. Ces politiques égoïstes engendrent des échanges qui conduisent à une assez bonne allocation, mais pas la meilleure de celles accessibles. La coordination des échanges par une autorité est, dans certains cas, envisageable, elle reste toujours difficile, car les agents croient qu'ils sont mieux placés que quiconque pour défendre leur intérêt. Le marché s'autorégule mal !

— Dans la réalité, les agents sont situés dans un espace qui n'est pas homogène. Des contraintes géographiques (ou d'autre nature) limitent les échanges possibles. En clair, le graphe des échanges possibles n'est pas un graphe complet (chaque agent n'est pas relié à chaque autre). Ce graphe « d'acointance » incomplet doit être pris en considération.

La modélisation multi-agents

Des travaux récents montrent qu'une série de transactions fondées sur une information locale et un graphe d'acointance permettent de s'approcher petit à petit d'une allocation optimale. On tente aussi de mettre au point des méthodes telles que plus on laissera les transactions s'opérer, meilleur sera le résultat atteint.

Plus les modèles tentent de devenir réalistes, plus il devient nécessaire de mettre en œuvre des techniques informatiques où chaque agent (économique, social, ou autre) est représenté par un programme indépendant. Les sources d'informations du programme et les interactions qu'il peut avoir avec les autres programmes du système sont définies et délimitées.

Ce type de représentation informatique, qui dans sa méthode approche du réel en mimant les composants objet par objet, est nommé simulation multi-agents. C'est une technique souvent plus satisfaisante que les modèles mathématiques, car la complexité de ces derniers est limitée par nos facultés de résolution des équations. Au contraire, la variété et la richesse des agents informatiques envisageables n'ont guère de bornes et permettent l'expérimentation systématique d'une multitude d'hypothèses complexes ainsi que la formulation d'explications naturelles.

Les systèmes multi-agents permettent de ne pas trop caricaturer le monde et accroissent l'intérêt des résultats obtenus. L'informatique aujourd'hui est une source de progrès dans la finesse et la précision des modèles, et tout cela permet aux chercheurs de découvrir sans cesse de nouvelles règles, de nouveaux principes et... de nouvelles morales.

ART & SCIENCE

Une pharmacopée à la Prévert

Un manuscrit du XVI^e siècle révèle les médicaments et les produits cosmétiques qui ont été vantés par l'École de médecine de Salerne, en Italie.

Cette institution faisait autorité en Europe au début du Moyen Âge.

Loïc MAILLON

Salerne est une ville du Sud de l'Italie, sise dans la région de Campanie, sur la côte amalfitaine. Du X^e au XIII^e siècles, la ville accueillit la plus ancienne université de médecine d'Europe, la *Schola Medica Salernitana*, qui profita de sa position privilégiée, aux confluent du savoir antique et du monde arabe : les traductions en arabe de traités médicaux en grec y ont été transcrites en latin tandis que les traditions des Grecs Galien (II^e-III^e siècles) et Dioscoride (40-90) y ont été enrichies. Salerne fut la plus importante source de savoir médical en Europe au début du Moyen Âge.

Parmi les figures majeures de cette école, Troscula publica au XII^e siècle le premier traité de gynécologie et d'obstétrique. Son supposé mari, le médecin Platearius, s'attacha à l'instar de ses confrères à compiler les savoirs du monde. Ainsi, dans son *Liber de simplici medicina* (le *Livre des simples médecines*), il a thésaurisé les vertus médicinales, mais aussi alimentaires et cosmétiques de quantité de produits. L'ouvrage, pour l'essentiel un herbier, fut un succès et fut recopié dans toute l'Europe. Un exemplaire réalisé au début du XVI^e siècle dans l'Ouest de la France est aujourd'hui exposé au musée national du Moyen Âge, à Paris, dans le cadre d'une exposition *Le Bain et le Miroir*, jusqu'au 21 septembre 2009. La deuxième partie de cette exposition – les œuvres de la Renaissance – est installée au musée de la Renaissance, à Écouen, dans l'Oise.

La page offerte aux yeux des visiteurs (page ci-contre) est une illustration de la pharmacopée de Salerne, qui tous étaient recherchés pour

quelque propriété. Voyons les prescriptions de Platearius pour chaque élément.

L'*Emathites*, l'hématite, un oxyde de fer (Fe_2O_3), restreignait le flux de sang (elle tire son nom du grec *emath*, le sang et du latin *thites*, poux). On l'utilisait notamment contre les saignements de nez, mais aussi, mêlée à du miel ou du lait de femme, pour soigner les yeux. Le *sphaltum*, l'asphalte, en poudre, favorisait la cicatrisation. Les *Belliduli*, ou nombres marins, sont des coquillages qui, en onction avec de la graisse de poule, éclaircissaient les visages. Les *Blactebi*, ou

L'*Argemone*, c'est-à-dire le mercure, tuait les poux. Le *Caulx*, ou chaux vive, associée à de l'huile et à du suif, éliminait les boutons. Le *Colofania*, ou colophane, est la gomme d'un arbre méditerranéen qui soignait l'asthme. L'*Os de seiche* pulvérisé blanchissait les dents et le visage. L'*Amidum*, l'amidon, améliorait la respiration et était recommandé en cas de toux. Enfin, la *Mumie* (la momie), quand elle était noire puante et ferme, soignait les saignements de nez. Ceux qui crachaient du sang de leur poitrine étaient traités avec des pilules faites de poudre de momie et de mastic.

Cette pharmacopée à la Prévert fit autorité pendant plusieurs décennies. Ainsi, au VI^e siècle, la poudre de momie était encore très demandée en Europe, car, selon certains médecins, le bitume qu'elle contenait guérissait diverses maladies.

L'ouvrage de Platearius est un exemple de ce que fut l'École de Salerne : un carrefour où convergèrent les savoirs, les momies venant d'Égypte, la colophane de Grèce, l'asphalte de Judée... Accréditant cette idée, une légende propose que l'École de médecine de Salerne ait été fondée par le Juif Helinus, le Grec Pontus, l'Arabe Adela et le Latin Salernus.

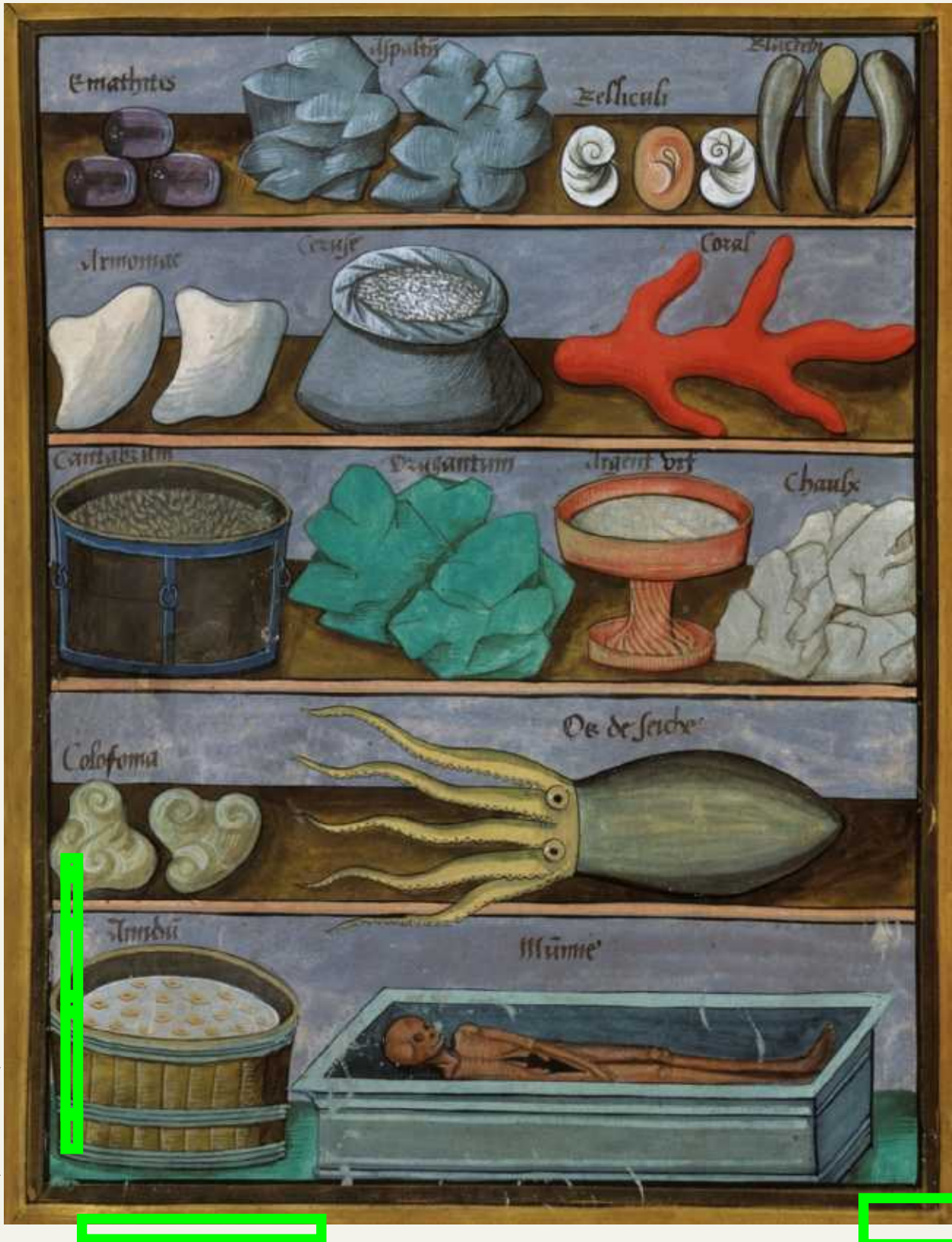
Le premier ouvrage qui a fait connaître Salerne est le *Pantegni*, 20 volumes de médecine traduits de l'arabe par Constantin l'Africain (1100-1102), un médecin dont l'arrivée à Salerne marqua le début de la renommée de la ville. Elle sera éclipsée au XIII^e siècle par l'École de médecine de Montpellier.

La planche s'éclipsera aussi et sera remplacée dès le 20 août par une autre page du manuscrit, afin de la préserver.

**Du vitriol contre
les hémorroïdes ;
de l'ammoniac
pour blanchir les dents ;
de la poudre de momie
quand le nez saigne...**

blattes de Byzance, sont des opercules de mollusques univalves, du genre pourpre, qui corrompaient et purifiaient l'organisme. L'*Armoniac*, un sel d'ammoniac que l'on trouve en Arménie, éliminait les taches sur le visage des femmes. La *Céruse*, ou blanc de Sturme ou fleur de plomb, est un pigment blanc utilisé comme fard. Le *Corail rouge* soignait les yeux et les poumons, blanchissait les dents et, même, préservait les maisons de la foudre. Le *Cantabrum*, le son du frolement, guérissait les douleurs urinaires et rénales. Le *Dragantum* (ou vitriol ou couperose) est un sulfate ferreux anhydre prescrit, par exemple, contre les hémorroïdes.

Regards



IDÉES DE PHYSIQUE

Jeux de boules creuses ou pleines

Dans les sports de boules, la façon de jouer dépend de la structure interne des boules utilisées.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Tirer ou pointer ? Pétanque ou boule lyonnaise ? À ces questions classiques s'ajoute celle du choix entre boules creuses et boules pleines. Nous, physiciens parisiens, ne trancherons pas entre les joueurs de pétanque, farouches défenseurs des boules d'acier creuses, et les amateurs de boule lyonnaise qui utilisent désormais, dans leur grande majorité, des coques de bronze remplies de caoutchouc. Essayons plutôt de comprendre comment la structure interne de la boule influence son comportement et quelles sont les conséquences du choix des matériaux adoptés par les fédérations sportives.

Vues de Paris, la pétanque, la boule lyonnaise et la bocce (italienne) présentent de fortes similitudes, tant pour le matériel utilisé que pour les règles. Ces jeux sportifs opposent deux équipes dont l'objectif est de lancer des boules afin qu'elles s'arrêtent aussi près que possible d'une petite boule de bois, le but (ou bouchon, ou cochonnet) lancé à plusieurs mètres des joueurs. Parmi les stratégies les plus communes, on peut « pointer », c'est-à-dire essayer d'amener sa boule aussi près que possible du but, ou « tirer », c'est-à-dire la lancer vivement afin qu'elle frappe une boule adverse et l'écarte du but (voir les figures 1 et 2).

Examinons maintenant le matériel. Faite en acier, une boule de pétanque pèse entre 650 et 800 grammes pour un diamètre compris entre 70,5 et 8 centimètres. Connaissant la masse volumique de l'acier (7,85 g/cm³), on calcule aisément qu'une boule de pétanque

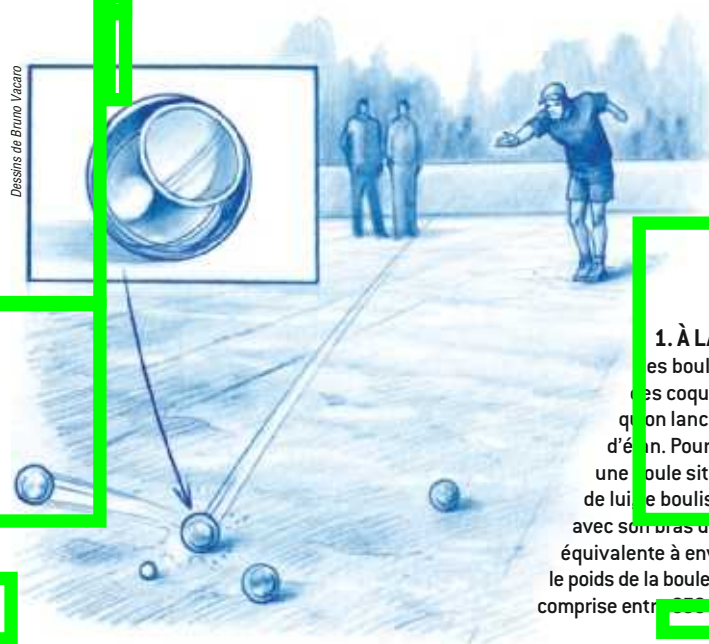
est 2,5 fois plus légère qu'une boule d'acier massif de même diamètre. Il en est de même pour les boules lyonnaises, plus grosses (diamètres compris entre 9 et 11 centimètres) et plus lourdes (pesant de 900 à 1 200 grammes). Comme nous l'avons indiqué, ces boules sont constituées d'une coque en métal, épaisse de quelques millimètres dont l'intérieur est vide ou rempli d'un matériau moins dense.

Une coque de métal

Au début d'une partie, une fois le bouchon lancé, il s'agit pour le premier joueur de pointer. Un élément déterminant est le terrain. Le rebond de la boule et le chemin qu'elle

parcourt en roulant dépendent de façon cruciale de la composition du terrain en terre, sable ou petits gravillons, et de son humidité. Une première tentation est de réduire l'influence aléatoire du terrain par un choix approprié du matériel. Des tricheurs y ont pensé, en faisant l'intérieur des boules d'un peu de sable ou de mercure. L'effet est d'abaisser le centre de gravité et de supprimer le roulement de la boule. Ce type de remplissage est totalement proscrit dans les différentes variantes des sports de boules.

Pour la pétanque, la seule marge de manœuvre est le choix de la dureté de l'acier utilisé. Comme les paramètres du sol sont difficilement mesurables, ce choix est fondé sur l'expérience et le style de jeu du bouliste.



1. À LA PÉTANQUE,

les boules utilisées sont des coques d'acier creuses, qu'on lance sans course d'élan. Pour tirer et déloger une boule située à huit mètres de lui, le bouliste doit déployer avec son bras une force équivalente à environ neuf fois le poids de la boule, dont la masse est comprise entre 650 et 800 grammes.

Concentrons-nous donc sur le tir, une phase du jeu où le terrain est moins déterminant.

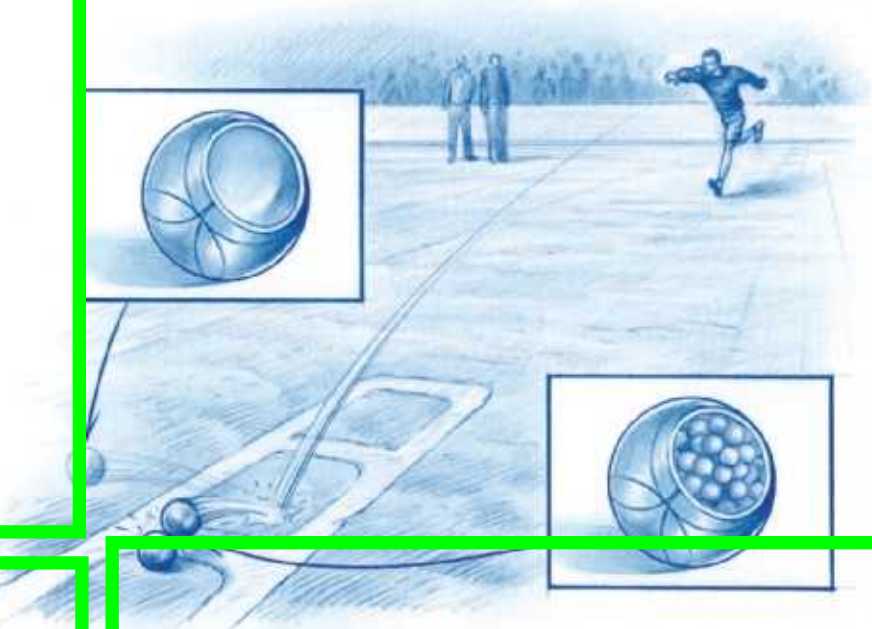
À la pétanque, le but se trouve entre six et dix mètres du lanceur. Si le joueur souhaite tirer une boule à, disons, huit mètres, il lui faut lancer sa boule à une vitesse minimale d'environ 8,5 mètres par seconde avec un angle un peu inférieur à 45 degrés. La trajectoire suivie par la boule est alors une parabole. L'effort requis n'est pas anodin. L'accélération de la boule avant le lancer, égale au rapport du carré de la vitesse par la longueur du bras du tireur, est de l'ordre de 10 mètres par seconde carrée, soit neuf fois l'accélération de la pesanteur. Autrement dit, pour la pétanque, la force nécessaire à la main pour lancer la boule atteint neuf fois son poids.

Lancer avec ou sans élan

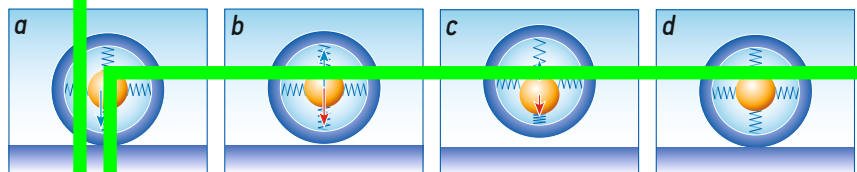
Pour la boule lyonnaise, la cible est à au moins 12,5 mètres, et la distance peut aller jusqu'à 18 mètres. Dans ce cas extrême, on doit propulser la boule à 13 mètres par seconde. Si le mouvement du tireur était identique à celui de la pétanque, la main aurait à fournir une force égale à 20 fois le poids de la boule. On comprend mieux la nécessité d'un élan : la vitesse de course du bouliste diminue d'autant la vitesse avec laquelle le bras doit propulser la boule.

Le tir de boule lyonnaise a d'autres préoccupations : pour déloger une boule adverse de sa position, l'idéal est de réaliser un tir tendu et de frapper « plein fer », c'est-à-dire de façon que la trajectoire de la boule lancée passe par le centre de la boule visée. Si les deux boules ont la même masse, on peut obtenir un transfert presque total d'énergie de l'une à l'autre, la première étant stoppée net tandis que la seconde part avec la même vitesse que la boule incidente.

Les bons tireurs réussissent presque systématiquement le plein fer. Mais il y a toujours des situations difficiles où il faut assurer le tir en se donnant un peu de marge d'erreur. Il faut mieux alors tirer légèrement trop court que trop long : la boule du tireur rebondit au sol juste devant la boule cible, puis la percuté (voir la figure 2). En pratique,



2. À LA BOULE LYONNAISE, le terrain est plus long qu'à la pétanque et les boules plus lourdes, ce qui explique le recours à une course d'élan. Par ailleurs, la plupart des praticiens de ce sport utilisent aujourd'hui des boules remplies de matériau caoutchouteux, qui rebondissent peu et qui, de ce fait, facilitent le tir. Ainsi, le tir illustré ici serait raté avec une boule creuse, qui rebondirait au-dessus de la boule visée sans la toucher.



3. À LA BOULE RACLEUSE, qui rebondit peu, peut être assimilée à une coque métallique (en bleu) séparée d'une masse interne (en orange) par une couche d'élastomère (symbolisée ici par quatre ressorts). Lorsque la boule heurte le sol, la coque et la masse interne ont la même vitesse (a). À l'instant précis du rebond, la vitesse de la coque s'inverse (b, flèche bleue). Les mouvements opposés de la coque et de la masse interne décentrent celle-ci et entraînent une compression de l'élastomère dans le bas de la boule et une extension dans le haut (c). En revenant à sa forme initiale (d), l'élastomère dissipe en chaleur une partie de l'énergie de l'impact, ce qui atténue le rebond.

le rebond est tel que si l'impact au sol se produit moins de dix centimètres devant la boule visée, celle-ci sera touchée. En revanche, si le tir est plus court, la boule rebondira au-dessus de sa cible, qui sera manquée.

Des boules racleuses

Mais nos amis italiens, aussi pragmatiques à la boucle qu'au football, ont trouvé une astuce simple en œuvre aux tournois mondiaux de Melbourne en 1988. Ils ont utilisé des boules dites racleuses, qui rebondissent très peu. Cette caractéristique est obtenue

✓ SUR LE WEB

Fédération française de pétanque et de jeu provençal : <http://www.petanque.fr/>

Fédération française du sport bouliste : <http://www.ffbo.fr/>



Retrouvez les articles de M. Courty et E. Kienik sur www.pourlascience.fr

Regards

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard MERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris.

Ils remercient Michel Couble, ancien président-directeur général de la Société *La boule intégrale*, de son aide pour la préparation de cet article.

en remplissant l'intérieur de la coque avec des matériaux caoutchouteux, qui dissipent en partie l'énergie du choc.

Pour comprendre le comportement d'une boule racleuse, supposons que la masse de la boule soit répartie pour moitié entre la coque et la masse interne, toutes deux reliées par une couche d'élastomère. Laissons tomber cette boule par terre (voir la figure 3). Au moment où la coque heurte le sol, elle rebondit et, si le choc est bien élastique, elle repart vers le haut avec la même vitesse que la vitesse initiale. À cet instant précis, coque et masse interne ont des vitesses opposées et égales : la quantité de mouvement totale de la boule est nulle et son centre de gravité immobile. Si l'élastomère qui relie coque et masse interne se comporte comme un amortisseur et dissipe en chaleur l'énergie qui le comprime, la coque et la masse interne sont

stoppées et le rebond est supprimé. Après cette absorption rapide d'énergie, l'élastomère reprend sa forme initiale et la boule retrouve son centrage.

Ainsi, on peut faciliter la tâche du tireur en réduisant le rebond grâce à un remplissage approprié de la boule. Est-ce acceptable du point de vue sportif ? Les fédérations ont trahi en fonction de leurs activités et de leurs traditions. Alors qu'à la pétanque, les remplissages ont été proscrits, ils ont été autorisés en boule lyonnaise, en raison de la longueur des lancers : la seule condition à respecter est que les boules restent centrées. Il n'existe pas de boule racleuse idéale, et c'est le joueur qui choisit le type de remplissage qui lui convient le mieux : mélange de poudre d'élastomère additionnée de particules métalliques, bracelets de caoutchoucs tenus par des ressorts en métal, etc.



LE COFFRET DE L'ANNÉE !

Tours du monde, tours du ciel

Une exploration de l'Univers à travers les âges

Pierre Léna et Michel Serres

Un film de Robert Pansard-Besson

Musique originale de Georges Delerue

Le 1^{er} documentaire culte de l'Astronomie

diffusé sur ARTÉ en 1989,

et maintenant en version remasterisée !

4 DVD (10 films de 52 min) + 1 livre (270 pages)

Isbn : 978-2-7598-0357-6

49 €



BON DE COMMANDE
à renvoyer à :
EDP Sciences - BP 112
91944 Les Ulis Cedex A

Nom / Prénom : _____
Adresse : _____
Tél : _____
Code Postal : _____ Ville : _____ Pays : _____

Titre	Prix unitaire	Quantité	Total
TOURS DU MONDE, TOURS DU CIEL	49 €	X	= _____ €
Frais de port	1 livre 2 livres 3 livres 4 livres 5 livres ou plus		
France métropolitaine	+ 4 € + 5 € + 6 € + 7 €		
DOM et Europe	+ 7 € + 9 € + 11 € + 13 €		
TOM et reste du monde	+ 9 € + 12 € + 15 € + 18 €		
TOTAL GÉNÉRAL			= _____ €

* Aucune commande ne pourra être expédiée sans ajout des frais de port.

Paiement au choix : ☐ par chèque à l'ordre d'EDP Sciences (à joindre à la commande)
☐ par carte bancaire : ☐ Visa ☐ Eurocard ☐ American Express
N° de carte : _____
Date d'expiration : ____/____/____ CCV (3 derniers chiffres au dos de la carte) : _____

Date : ____/____/____
Signature : _____
P.L.S. X414007

SCIENCE & GASTRONOMIE

La cuisine note à note

Les composés purs que l'on sait isoler ou synthétiser offrent des possibilités de mélanges inédits. À la clef, des goûts nouveaux qu'il faut apprendre à imaginer.

Hervé This

Les primates que nous sommes pâtissons de notre « néophobie alimentaire » : l'évolution a favorisé un comportement qui a permis à l'espèce humaine de proliférer et qui consiste à ne pas manger ce qui est « nouveau », c'est-à-dire ce que nous n'avons pas goûté quand nous étions enfants. Cette néophobie a l'avantage de nous prémunir contre la tentation de manger des produits toxiques, mais elle a l'inconvénient de faire de nous des « réactionnaires gastronomiques » : la meilleure cuisine risque d'être toujours celle de notre enfance !

En réalité, nous sommes doublement enfants. La seconde fois, parce que, paradoxalement, nous ignorons souvent le passé alimentaire de notre espèce (« Tout homme qui ne connaît que sa génération est un enfant », disait Cicéron). Il n'y a pas eu d'âge d'or alimentaire dans le passé, et la cuisine classique n'est pas mieux que la nôtre, même si elle fut exécutée par des Carême, Escoffier, Taillevent, La Varenne. La tradition ? Elle n'est une garantie de rien, en matière alimentaire, et la capacité de primates que nous avons d'éviter les intoxications à court terme n'évite pas les intoxications à plus long terme ; la tradition n'est pas la garantie de la perfection.

Il y a une quinzaine d'années, la proposition de cuisiner avec des composés définis nous a semblé, avec Nicholas Kurti, une provocation. Pourtant, était-elle vraiment insensée ? Puisque nous mangeons des composés quand nous consommons viandes ou légumes, pourquoi ne pas employer ces composés purs, puis des composés qui ne sont pas présents dans les tissus animaux ou végétaux ?

Un continent immense s'ouvre aux gourmands qui vont défricher les nouveaux territoires. Les citadins n'ont accès qu'à une petite centaine de variétés végétales et à autant de produits animaux : le nombre de combinaisons est donc de l'ordre de 10 000. En revanche, puisque chaque tissu animal ou végétal enferme des milliers de composés différents (en concentrations suffisantes pour avoir un fort sensoriel), la terre inconnue est environ 100 fois plus grande (si l'on va chercher les composés mineurs, le continent inexploré grandit considérablement).

Oui, mais *hinc sunt leones* (« Ici vivent les lions », disaient les anciennes cartes en désignant l'extérieur du monde connu : il y a danger). Les cuisiniers qui s'aventureront devront être audacieux et prudents.

En attendant, comment seraient des plats composés de composés ? Il n'est pas nécessaire qu'ils soient mous : le caramel, qui s'obtient par simple chauffage de saccharose, durcit quand il refroidit. La caramélisation, d'ailleurs, s'accompagne de la formation de nombreuses molécules nouvelles (glyoxal, méthylfurfural, à l'odeur de caramel ; anhydrides de fructose, etc.), ce qui montre que notre compte précédent est bien en deçà de la vérité.

Quels goûts auront les plats obtenus composé par composé ? Celui que l'on voudra en fonction de nos souhaits, car une cuisine ainsi faite sera plus précise : alors que le cuisinier classique n'a qu'une faible possibilité de régler la concentration des composés présents (l'ajout d'un légume, d'un fruit, d'une viande, d'un poisson dans une casserole s'accompagne de l'ajout de tous les composés pré-

sents dans l'ingrédient, sans possibilité de moduler les concentrations), l'emploi de composés purs permet de meilleurs réglages. Il est juste de comparer la cuisine classique à l'emploi, en peinture, de couleurs qui ne seraient pas élémentaires : impossible de faire du jaune par mélange de marron et de violet.

Le goût, alors ? La possibilité de reproduire, si elle existe, est sans intérêt : pourquoi refaire le goût des carottes, des navets, du bœuf ou de l'huître alors que l'on dispose de carottes, de navets, de bœuf ou d'huîtres ? En revanche, si le cuisinier moderne explore les nouveaux territoires, il aura les plus grandes difficultés à imaginer les goûts qu'il pourra obtenir. L'industrie des odeurs parviendra péniblement à acquiescer la compétence de prévision de leurs mélanges, mais, en cuisine, s'ajoutent la saveur, la fraîcheur, le piquant, la consistance, la température.

Les plats élaborés composés par composés sont réellement inédits, et il faut les goûter pour en avoir le goût. Le cuisinier français Pierre Gagnaire a mis plusieurs mois avant d'arriver à un résultat gustativement et artistiquement satisfaisant. Quel était le goût de ce plat, nommé « Note à Note » ? Vous devrez reproduire le plat pour goûter et le savoir.



Hervé THIS dirige l'Équipe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'Agneaux, Institut national de la recherche scientifique et culturelle Alimentaire (Acad. des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.purlascience.fr



Je - Michel Thiriet

SAVOIR TECHNIQUE

Ampoules fluorescentes et compactes

Les ampoules à incandescence sont censées avoir vécu : l'avenir, du moins l'avenir proche, est aux ampoules fluocompactes, sortes de petite néons enroulés sur elles-mêmes.

François SAVATIER

Ampoules à incandescence de 100 watts, 75 watts, 60 watts, 40 watts, 25 watts... Plus de 80 watts ne pourront plus être vendues. Du moins est-ce la règle prescrite par la directive 2005/32/EC de la Commission européenne. Une série d'étapes ultérieures est prévue pour exclure du marché toutes les ampoules consommant trop, d'ici le 1^{er} septembre 2016.

Pendant cette période de transition, les fabricants vont travailler pour améliorer les sources de lumière qui remplaceront les ampoules classiques à incandescence. Pour autant, ces dernières constituent déjà une prouesse technique, car pour que leur filament de tungstène, qui brille vers 2 200 °C, puisse durer, il doit être parfaitement lisse. Cependant, ces ampoules transforment

90 pour cent de l'énergie électrique sont perdus sous forme de chaleur. Aujourd'hui, de telles pertes d'énergie sont inacceptables.

La fluorescence devrait remplacer l'incandescence. Elle nous est déjà familière sous la forme des tubes que nous nommons improprement « néons ». Pour aboutir aux ampoules fluocompactes, il a fallu améliorer le fonctionnement de ces tubes en remplaçant leur ballast magnétique – un dispositif destiné à déclencher et à entretenir l'arc électrique – par un ballast électronique. Ce circuit évite les clignotements caractéristiques des néons et rend possible l'emploi de tubes étroits et leur enroulement au-dessus d'un culot à vis classique. Ainsi, une ampoule fluocompacte de 26 watts est aussi brillante qu'une ampoule à incandescence de

100 watts, alors qu'elle consomme quatre fois moins. Malheureusement, sa lumière est crue ; c'est pourquoi les ingénieurs cherchent à améliorer la phosphorescence de la couche recouvrant l'intérieur du tube pour enrichir le spectre lumineux et le rendre plus proche de celui de la lumière blanche naturelle.

Toutefois, si leur prix baissait, les diodes électroluminescentes pourraient concurrencer même les ampoules fluocompactes. Leur rendement est aussi bon que celui des ampoules fluocompactes, et elles durent trois fois plus longtemps ! Les diodes électroluminescentes munies d'un culot d'ampoule classique déjà mises au point n'émettent guère plus qu'une ampoule à incandescence de 25 watts, en coûtant beaucoup plus. L'avenir est pour le moment aux ampoules fluocompactes.

LES PRINCIPAUX INCONVÉNIENTS DES AMPOULES FLUOCOMPACTES

DÉCHETS DANGEREUX

Parce qu'elles contiennent environ cinq milligrammes de mercure (sous forme de vapeur), les ampoules fluocompactes sont considérées comme des déchets dangereux.

C'est pourquoi il est interdit de les jeter avec les ordures ménagères, afin qu'elles ne contaminent pas les cours d'eau.

ACCIDENTS

Pour la même raison, il faut immédiatement

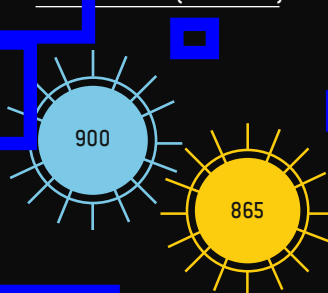
aérer une pièce où a été brisée une telle ampoule et quitter au quart d'heure la pièce afin que les vapeurs lourdes de mercure aient le temps de se déposer sur le sol. Ensuite, on nettoiera à l'eau ou balaiera.

ÉCONOMIE D'ÉNERGIE

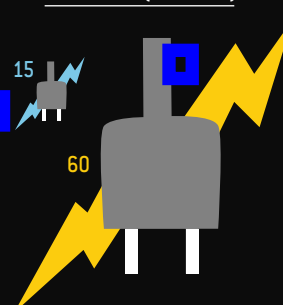
À brillance égale, les ampoules fluocompactes consomment moins d'électricité et durent plus longtemps ; mais elles coûtent plus cher.

■ Ampoule fluorescente compacte
■ Ampoule à incandescence

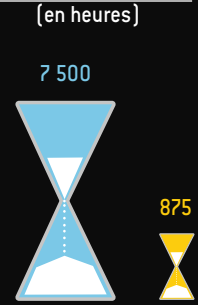
FLUX LUMINEUX (en lumens)



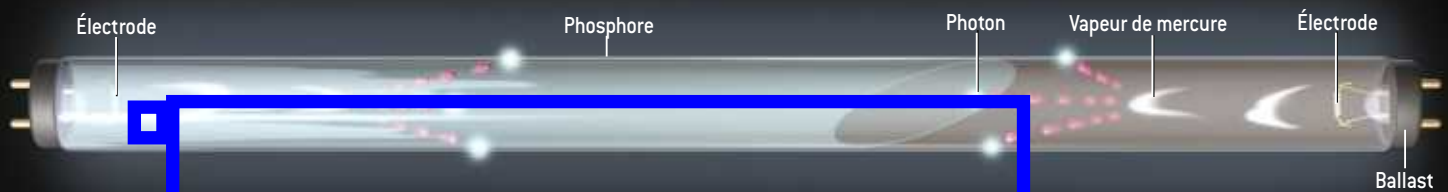
PUISSANCE (en watts)



DURÉE DE VIE MOYENNE (en heures)

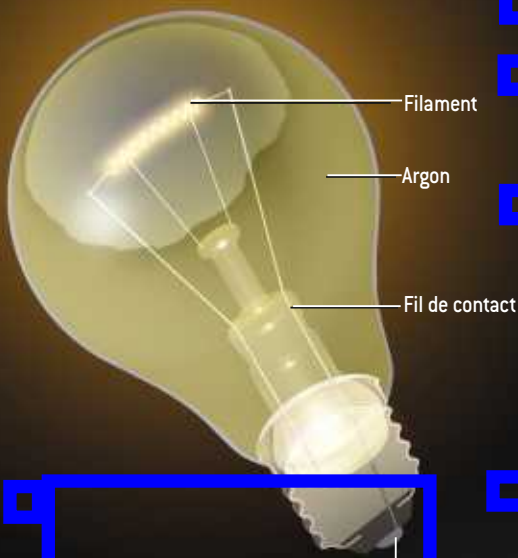


Amelia Maori Molnar



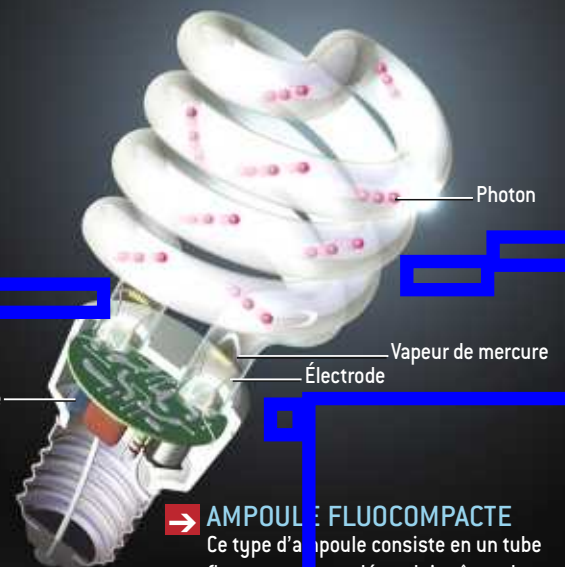
→ TUBE FLUORESCENT

Un ballast (à droite) réduit le courant pour produire un voltage élevé, lequel établit un arc électrique entre deux électrodes de tungstène. L'arc excite les atomes de mercure qui se trouvent à l'état de vapeur dans l'ampoule, ce qui provoque l'émission de photons ultraviolets. Ces derniers parviennent dans l'ampoule où ils sont absorbés par le phosphore, ce qui provoque l'émission de lumière visible (provoquée par l'absorption et la réémission de photons par les électrons des atomes de phosphore). La présence d'argon dans le tube accélère le démarrage de l'émission lumineuse et augmente sa brillance.



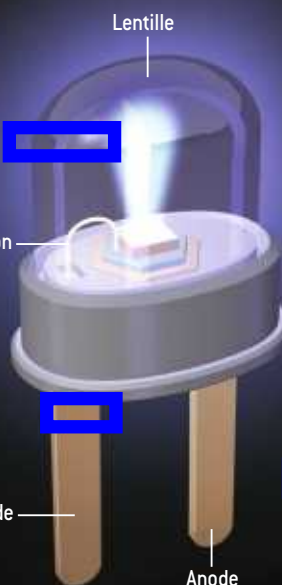
→ AMPOULE À INCANDESCENCE

Des fils de connexion conduisent le courant électrique jusqu'à un filament de résistance élevée, en tungstène généralement. Le passage du courant porte rapidement le filament à incandescence, de sorte qu'il émet de la lumière. Avec le temps, des atomes de tungstène s'évaporent, ce qui amincit le filament jusqu'à provoquer sa rupture. Dans les bulbes de plus de 25 watts, le filament est rempli d'un gaz inerte, tel l'argon ou le xénon, de façon à ralentir l'évaporation du tungstène.



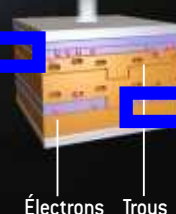
→ AMPOULE FLUOCOMPACTE

Ce type d'ampoule consiste en un tube fluorescent qui est plié en forme de spirale. Ses deux extrémités se joignent dans un culot (base) d'ampoule, ce dernier contenant un ballast électronique.



→ DIODE ÉLECTROLUMINESCENTE

Du courant électrique circule dans une diode de semi-conducteur : elle met en mouvement des électrons et des « trous » (des absences d'électrons), qui, en se recombinant, émettent un photon d'une longueur d'onde – ou couleur – définie. Des semi-conducteurs différents émettent des couleurs différentes. Pour leur faire émettre de la lumière blanche, on combine des diodes à émission rouge, verte et bleue à l'intérieur d'une même ampoule. Une couche de phosphore à l'intérieur d'une diode à émission bleue permet d'exploiter la phosphorescence.



→ LES DIODES électroluminescentes émettent de la lumière lorsque les « trous » se rencontrent.

→ BIOGRAPHIES

Chez les Weil

André et Simone

Sylvie Weil

Buchet & Chastel, 2009

(270 pages, 16 euros)



Rare, sûrement, sont ceux qui sont familiers à la fois de l'œuvre d'André Weil (1906-1998), mathématicien, cofondateur du groupe Bourbaki, et de celle de sa sœur, la philosophe Simone Weil (1909-1943). Sylvie Weil, fille d'André, donc nièce de Simone, est bien placée pour décrire les univers mentaux de ces deux géants. Elle est toujours restée proche de son père. Et, si elle n'a pas connu Simone, morte l'année de sa naissance, elle a connu les parents de celle-ci, et a baigné dans une atmosphère où la mémoire de Simone était omniprésente. Composé de souvenirs, de réactions personnelles, d'anecdotes, ce livre, par petites touches, éclaire les personnalités d'André et de Simone.

La mort quasi volontaire de Simone a brisé ses parents et engendré des difficultés sans nombre entre eux et André. L'enfance de Sylvie a été entourée de conflits familiaux. D'où une relation complexe de Sylvie avec sa tante disparue, faite d'admiration et de colère mêlées. Toutefois, le lecteur scientifique sera peut-être plus curieux d'André, personnalité moins souvent analysée que Simone. Voici quelques traits. Cet homme, qui ne passe pourtant pas pour avoir été modeste, avoua un jour à un ami qu'il pensait que sa sœur lui avait été bien supérieure : « Moi, je n'ai été qu'un mathématicien ». L'aisance d'André Weil pour les langues n'interdit pas à Sylvie Weil, de la part de sa famille : « Il parlait l'italien

comme Dante, l'espagnol comme Cervantès et ainsi de presque toutes les langues vivantes. Qu'il rendait nos vies vivantes, il faut bien le dire.

Le gifi André Weil fut à la fois solidaire des juifs et en porte-faux avec eux. En 1979, en Israël, il tombe malade au point de devoir aller se coucher après avoir vu l'intolérance de juifs rigoristes contre les voitures roulant le samedi. « Que des juifs puissent être aussi cons ! » En 1973 (guerre du Kippour), il envoie de l'argent pour soutenir Israël, ce qui surprend sa fille et dont il s'explique ainsi : « Je n'aime pas spécialement les juifs, mais j'aime encore moins ceux qui veulent les foutre à la mer. » Quant à la vie de famille d'André, elle fut faite d'humour et de plaisanteries, mais aussi de querelles durables. Le séjour en Inde des années 1930, marquant par les découvertes mathématiques du « gifi » Weil, prend une coloration inattendue quand on apprend qu'il voulait fuir une mère étouffante. Les conflits avec ses parents durèrent jusqu'à leur mort. Les esprits supérieurs ne se sortent pas mieux que les autres des histoires de famille...

Didier Nordon

Université de Bordeaux

→ PALÉONTOLOGIE

Au commencement était le poisson

L'homme : 3,5 milliards d'années d'évolution

Neil Shubin

Robert Laffont, 2009

(243 pages, 20 euros)

Les récentes découvertes de l'évolution-développement, discipline résultant de la convergence de domaines tels que la paléontologie, la biologie du développement et la biologie moléculaire, éclairent d'un jour nouveau notre compréhension de l'évolution des espèces.

Un livre informant le grand public de ces nouvelles avancées scientifiques manquait. En voici un, et un bon. Loin des ouvrages théoriques abscons, ce livre présente de façon très accessible des notions considérées comme ardues, gageure brillamment réussie par l'auteur.

Neil Shubin est le codécouvreur de *Tiktaalik*, cet animal du Dévonien (370 millions d'années) de l'Arctique canadien considéré comme le plus proche parent des tétrapodes (animaux munis de pattes et de doigts). Paléontologue, il est également professeur d'anatomie humaine et spécialiste de la biologie du développement à l'Université de Chicago. Neil Shubin nous invite à une passionnante introspection sur les lointaines origines animales de notre anatomie conservée. Les traces, pour ne pas dire les cicatrices. Ses réflexions sont si limpides et apparaissent si évidentes que le lecteur pourra trouver qu'il est finalement facile d'établir des sujets de recherche novateurs et de proposer de grandes théories ; c'est évidemment loin d'être le cas, mais cela en fait l'une des qualités de ce

livre. L'auteur rappelle que nous n'avons pas été rationnellement conçus, encore moins créés, mais que nous sommes le produit d'une longue histoire alambiquée. La cristallisation du fameux « bricolage de l'évolution » de François Jacob (1981), ce récit, parsemé d'exemples issus de la médecine, retrace notre histoire évolutive. Les raisons de certains de nos maux sont en effet à retrouver chez nos lointains cousins animaux (le hoquet : inhalation et brusque fermeture de la glotte des lézards ; cancer : perte de la coopération entre cellules et retour à l'individualisation des organismes unicellulaires, etc.).

La vision contemplative de la complexité de notre corps et de notre place dans l'arbre de la vie est éclairée par la compréhension de l'histoire évolutive des structures du vivant. Voir notre corps et connaître son histoire, tout simplement. Une métaphore pourrait être proposée : l'émotion pure



éprouvée au regard de la délicatesse et de l'apparente fragilité d'une cathédrale gothique, renforcée par la connaissance des moyens architecturaux employés par les bâtisseurs.

À choisir, préférez la version originale (« Your inner fish »), le traducteur s'étant permis trop

de libertés dans les termes (*salamander* ne peut pas dire *tritron*) et dans les faits (où l'on découvre que les « reptiles » ont deux os dans l'oreille moyenne – au lieu d'un seul dans la version originale).

Un livre intelligent, facile à lire, relevé de notes d'humour, qui vous permettra de mieux vous connaître, jusqu'au fond de vos cellules (l'auteur vous donne d'ailleurs la recette de l'émulsion de votre ADN, à réaliser dans votre cuisine...).

→ **Gaël Clément**

Muséum national d'histoire naturelle, Paris

Avec les découvertes de l'éthologie, parcourons les chapitres : on trouve, chez les animaux, raison, émotions, communications complexes et langages, cultures, comportements « moraux », rela-



→ ÉTHOLOGIE

L'animal est-il une personne ?

Yves Christen
Flammarion, 2009
[540 pages, 24 euros].

« L'animal » est un thème d'actualité. Chaque revue publie son numéro « animalité ». Groupes privés et instances gouvernementales y consacrent rencontres et congrès. Il était donc utile qu'après d'autres livres plus érudits, paraisse en français un ouvrage susceptible de faire la « somme » des connaissances actuelles sur les aptitudes des animaux. C'est chose faite avec ce livre, qui offre un panorama complet des plus récentes découvertes sur leur comportement et leurs capacités cognitives. Alors que l'animal est souvent perçu, par rapport à l'homme, en termes négatifs de « manques », l'auteur, darwinien convaincu, s'applique à montrer, en s'appuyant sur des références détaillées, qu'il y a toujours une continuité positive entre l'humain et l'animal.

tions sociales, conscience, attribution d'intentions à un autre être, empathie, « histoire », un vécu existentiel parfois intense... : « L'aver- de la psychologie comparée passe davantage par la mise en évidence d'une éventuelle différence d'échelle dans les processus cognitifs que par la vaine quête d'un [...] fossé cognitif entre nous et le reste du vivant ». Même si, bien sûr, la continuité cognitive suppose des êtres intellectuellement proches de l'homme (mammifères et oiseaux notamment) qui fondent l'essentiel de l'argumentation, mais aussi des êtres plus éloignés.

La réponse à la question du titre est affirmative. Formulée pour un léopard, elle vaut pour tout animal capable d'autonomie : « Il est individu parce qu'il diffère de tous les autres et une personne parce qu'il est, en tant que sujet, il s'insère dans un réseau de relations individuelles ». D'où les mouvements qui, de nos jours, contrairement à la tradition post-cartésienne de l'« animal-objet », reconnaissent certains droits pour les

animaux. Face à « une différence qui diminue sans cesse » entre l'espèce humaine et les espèces cousines, le livre de Y. Christen invite à une salutaire réflexion sur les limites d'un « propre de l'homme ». Rempli d'anecdotes, particulièrement agréable à lire, l'ouvrage passionnera les lecteurs non spécialistes. En même temps, par ses nombreuses références, notes et annexes, il constitue un ouvrage utile pour les spécialistes. Il s'adresse donc à un très large public.

→ **Georges Chapouthier**

CNRS

→ ÉPISTÉMOLOGIE

Petit traité de l'imposture scientifique

Alexandra Kroh
Beyn, 2009
[214 pages, 18 euros].

Les charlatans prospèrent de l'ignorance du public et de sa promptitude à s'en remettre à l'autorité des experts. « Il est aisé d'en imposer au public qui croit le charlatan sur sa parole, vu l'impossibilité où il est de juger par lui-même »,



STEPHEN HAWKING

Kristine Larsen
Dunod, 2009
[212 pages, 10 euros].

Cette biographie du célèbre cosmologiste a ceci d'intéressant qu'elle montre que l'étonnante survie du grand homme et son esprit est due à l'amour qu'il a pour la science. Un récit fascinant de la façon dont le génie humain peut être sauvé du handicap et même renforcé.

HISTOIRE DES PARCS NATIONAUX

Coordonné par R. Larrère, B. Lizet et M. Berlan-Darré

Éditions Quae, 2009
[236 pages, 30 euros].

Cet ouvrage rassemble, sous la direction de deux sociologues et d'une ethnologue, des contributions qui retracent l'évolution des Parcs nationaux français, depuis la protection d'une nature supposée vierge jusqu'à la gestion d'un territoire vivant. Il reste à relever : associer les populations locales, souvent hostiles initialement, pour faire des partenariats.

TOURS DU MONDE, TOURS DU CIEL

Pierre Lénard et Robert Pansard-Besson
EDP Sciences, 2009
[272 pages, 12 euros].

En 1990, Robert Pansard-Besson réalise un documentaire de dix heures sur l'Univers et la vision qu'en eurent les hommes à travers les âges. Sur *La Sept* (l'ancêtre d'Arte), il eut à l'époque un grand succès. Pour les amateurs, le voici sous la forme de quatre DVD complétés d'un livret de 120 pages, de dialogues entre le cinéaste, le philosophe Michel Serres et l'astrophysicien Pierre Lénard.

BONNES NOUVELLES DES ÉTOILES

Jean-Pierre Luminet et Élisabeth Brune

Odile Jacob, 2009 (332 pages, 25 euros).



Voici un livre de culture générale sur les « sidérantes révolutions » amenées par les progrès de l'astronomie d'observation. Astrophysicien à l'Observatoire de Paris, le premier auteur y collabore avec le second, journaliste scientifique, pour expliquer les grandes découvertes récentes à l'échelle du Système solaire, à celle de la galaxie et à celle de l'univers.

L'ENFANT FACE À LA SÉPARATION DES PARENTS

Gérard Neyrand

La Découverte, 2009

(268 pages, 15 euros).

L'auteur analyse en détail les arguments avancés par les partisans et les détracteurs de la garde alternée, ainsi que la position des hommes de loi face à cette nouvelle forme de vie familiale des enfants. Il montre l'intérêt de cette organisation et les menaces que la disparition du couple fait peser sur les liens vitaux unissant les enfants à leurs parents.

L'EAU, UN TRÉSOR EN PARTAGE

Ghislain de Marsily

Dunod, 2009

(256 pages, 15 euros).

L'auteur accomplit un tour complet de la question de l'eau en tant que ressource. Il en conclut notamment que de l'eau, il en aura assez. Elle ne sera pas où l'on voudrait qu'elle soit, mais elle existera toujours en quantité suffisante pour que l'humanité produise sa nourriture. Clair et précis, le livre rassemble de précieuses et précises informations sur cette question cruciale.



lit-on dans l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert. Tout le problème sera donc de distinguer la « bonne » science de la « mauvaise » science ? Telle est la passionnante question qui anime le livre d'Aleksandr Kroh. L'imposture, parfois potache, parfois inconsciente, parfois amusante, parfois criminelle, accompagne l'histoire des sciences comme son ombre ou son double. Mais, pour le profane, les raisons de trancher sont souvent bien faibles : certains prix Nobel défendent aussi les théories insolites, et souvent l'idée farfelue peut se draper de la parure de l'originalité bafouée. Si l'imposteur est souvent marginalisé, il accable à son tour les savants établis, qu'il juge trop rigides. Entre l'innovation originale et l'erreur farfelue, la frontière floute parfois et A. Kroh nous fait courir le long de cette limite incertaine.

Enfin nous propose un parcours de l'imposture scientifique à travers quatre thèmes : les extraterrestres, le lyssenkisme ou la biologie prolétarienne russe (antigénétique des races humaines, le créationisme (anti-évolutionniste). Sur chaque cas, le livre rassemble des dossiers richement informés. Les extraterrestres ouvrent le domaine des photos truquées et de l'espionnage. Les rapports entre science et idéologie politique sont interprétés à travers le lyssenkisme soviétique, mais aussi avec le racisme qui a participé à l'aventure de la colonisation et aux prétentions des Européens imbues de leur supposée « supériorité », de « civiliser » les « sauvages ». Le cas du créationisme enfin nous montre comment science et religion confondent souvent leurs magistères et se trouvent du coup mises en opposition.

Autrement dit, A. Kroh présente des faits et des idées très intéressantes.

tures : en art, en sciences passées qu'on en sont plus, prétentions de non-scientifiques à dire la science au mépris de l'évidence. Lire cet ouvrage invite à réfléchir sur la science en société. Mais c'est aussi un constant rappel que la science ne va pas sans une éducation, qu'elle soit pas un endoctrinement, mais une initiation aux modes et procédures du raisonnement scientifique : protocoles expérimentaux, respect des faits, tests et vérifications... Si les imposteurs ont su s'imposer, c'est pour n'avoir pas respecté ces différentes consignes. Ce livre est un bon habillage pour jouer des modes et des idéologies.

Thierry Hoquet

Département de philosophie, Université Paris X Nanterre

→ SOCIOLOGIE

La peau

Enjeu de société

Sous la direction de D. Le Breton,

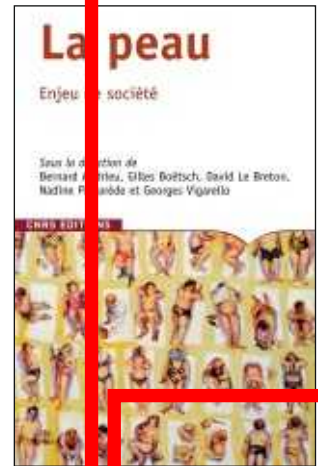
N. Pamarès, C. Vigarello,

B. Audebert et G. Boetsch

CNRS Éditions, 2009

(384 pages, 12 euros).

La peau, l'enveloppe qui nous protège et nous enferme, la vitrine qui nous révèle et nous expose, miroir qui nous flatte ou nous humilie... La peau, composante essentielle de notre intimité, de notre faire-valoir et... de nos tourments. Peau-masque, peau coiffée, peau blanchie ou bronzée, « peaufinée », masquée, parée, trouée, percée, modelée : elle est ainsi l'objet identitaire



de nos masques et celui d'un enjeu personnel d'intégration ou de détermination sociale.

Reunies au sein du comité scientifique de l'Observatoire NIVEA, les auteurs de cet ouvrage puisent leur expertise dans différents domaines de compétence. Somme exceptionnelle d'une grande acuité sur les métamorphoses contemporaines, ce livre nous permet de mieux comprendre les enjeux individuels, sociaux et médicaux en lien avec la peau et ainsi de mieux déchiffrer et accepter la diversité des représentations sociales qui s'offrent à notre vue au quotidien. Les auteurs proposent, en conclusion, quelques jalons pour mieux comprendre les nouveaux enjeux de la cosmétique de demain, tout en nous incitant à prendre soin de nous-mêmes. Selon eux, l'esthétique de l'apparaître contribue à apprivoiser et à construire notre propre identité. La peau n'a pas dit son dernier mot!

Bernard Schmitt

Centre hospitalier de Bretagne Sud

retrouvez votre magazine et des informations complémentaires sur www.pourlascience.fr

POUR LA SCIENCE.fr