Pour la Science

POUR LA SCIENCE

Décembre 1997

édition française de
SCIENTIFIC AMERICAN

Les faux souvenirs

Le laser Mégajoules

Les concours mandarinaux

Les sables qui chantent

Les plus grands séismes

La vie chez les Aztèques

Les télescopes gravitationnels

Mercure, planète oubliée

BLOC-NOTES de Didier Nordon 7

TRIBUNE DES LECTEURS 8

POINT DE VUE
Les scientifiques étrangers 10
par Antony Mauvais

PRÉSENCE DE L'HISTOIRE
Irène Joliot-Curie 12
par Pierre Radvanyi

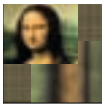
SCIENCE ET FINANCE
Les fractales et la Bourse 16
par Benoit Mandelbrot

SCIENCE ET GASTRONOMIE
Chaud devant 20
par Hervé This

JEU-CONCOURS
Jeu d'allumettes 22
par Pierre Tougne

MÉTIER DE L'INGÉNIEUR
L'innovation et le paradigme industriel 23
par Alain Etchegoyen

PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 24
La malédiction du tyrannosaure ■ La mémoire saisie au vol ■ L'ataxie de Friedreich ■ Le colza et la ravenelle ■ Les fractions égyptiennes ■ MIRACL, le laser destructeur de satellites ■ Digestion et somnolence ■ Éparpillement linguistique



LOGIQUE ET CALCUL
Images brouillées, images retrouvées 102
par Jean-Paul Delahaye et Philippe Mathieu

ANALYSES DE LIVRES 108
■ *Guide des 134 réserves naturelles de France*, de Chantal Cans et Antoine Reille
■ *Idées folles, idées fausses en médecine*, de Petr Skrabanek et James McCormick
■ *La science de Jurassic Park. Comment fabriquer un dinosaure*, de Rob DeSalle et David Lindley

INDEX 1997 112

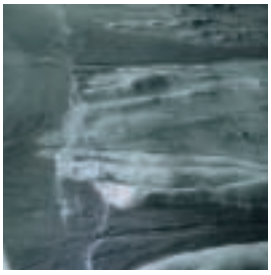
Sur notre site Web (http://www.pourlascience.com), vous trouverez des compléments bibliographiques sur les articles de *Pour la Science*.

Les faux souvenirs 34
par Elizabeth Loftus

La suggestion et l'imagination créent des souvenirs d'événements qui ne se sont jamais produits.

La préparation d'un grand séisme 42
par A. Cisternas, L. Dorbath, B. Delouis et H. Philip

Un tremblement de terre a dévasté la côte Nord du Chili il y a 120 ans. L'accumulation des contraintes tectoniques dans la région déclenchera bientôt une catastrophe semblable.

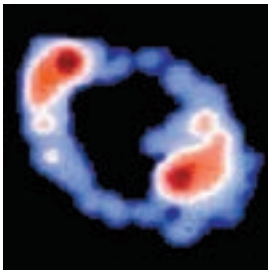


Les concours mandarinaux 50
par Rainier Lanselle

Le recrutement des fonctionnaires de l'empire bureaucratique chinois se faisait par un concours qui a subsisté plus d'un millénaire.

Les télescopes gravitationnels 58
par Françoise Combes et Tommy Wiklind

Les masses situées entre les sources de lumière célestes et la Terre courbent la lumière. Les images déformées des sources nous renseignent sur leur éloignement et sur la structure de l'Univers.



© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

La richesse des provinces de l'Empire aztèque 66

par Michael Smith

La population aztèque produisait des étoffes qu'elle échangeait contre des marchandises importées d'autres régions et de l'extérieur de l'empire.

Le laser *Mégajoules* 76

par Jacques Coutant

Ce laser, en construction près de Bordeaux, devrait faire progresser la physique des plasmas thermonucléaires et provoquer la fusion nucléaire contrôlée du deutérium et du tritium.

Mercure, la planète oubliée 84

par Robert Nelson

Malgré sa proximité, ce monde étrange nous est presque inconnu.

Dan Dixon

La musique des sables 94

par Franco Nori, Paul Sholtz et Michael Bretz

Pourquoi certains sables crissent, tandis que d'autres mugissent.

ÉDITORIAL

La leçon chinoise

Pour se préparer à l'examen des lettrés chinois, les candidats devaient apprendre plus de 200 caractères (un caractère équivalent à un mot) par jour pendant six ans, mémorisant ainsi les 431 286 caractères constituant les classiques chinois. L'examen (voir *Les concours mandarinaux*, par Rainier Lanselle, page 50) est resté inchangé pendant plus de dix siècles, preuve de son utilité sociale.

Ce système de sélection formait des administrateurs de l'État, zélés et dociles, des exemples de vertus confucéennes. L'empereur avait le devoir de choisir pour le gouvernement du peuple les meilleurs fonctionnaires, et les fonctionnaires devaient contribuer par leur juste administration au bien général, faire apprécier la sagesse et le bien fondé du système impérial.

Les lettrés, intellectuels d'une société hiérarchisée, n'étaient pas des politiques, et la monarchie chinoise n'était pas remise en question. L'intellectuel chinois ne s'appliquait qu'à suivre au mieux les règles de pensée sans les contester, ce que le souverain ne savait supporter : rare le lettré ayant déçu la mansuétude du souverain qui était laissé en vie, heureux le contestataire qui n'était pas banni ou torturé. Mille ans de concours ont façonné la mentalité chinoise, et le refus permanent de prendre en compte une remise en cause de la politique gouvernementale a de profondes racines.

La non-contestation de la chose établie ne favorisait pas non plus le progrès des sciences en Chine. Seules les mathématiques plaisaient, par leur immanence, à une petite fraction de lettrés.

On dit que cet examen a inspiré l'institution du baccalauréat. L'esprit de démocratie et d'égalité des chances peut-être, pas les programmes. Si le progrès est mesuré par le changement, les modifications des programmes font de la France l'antipode culturel de la Chine.

Philippe BOULANGER

BLOC-NOTES

Par Didier Nordon

L'atélécole

Les enfants passent trop de temps devant la télé, ils passent trop de temps avec les jeux vidéo... Comment mettre fin à ce triste phénomène? Voici une suggestion. Que l'école, dès la maternelle, enseigne aux enfants à regarder la télé, qu'elle leur enseigne à jouer aux jeux-vidéo-et, bien sûr, qu'elle sanctionne ceux qui n'apportent pas un soin suffisant à cette étude.

Il n'est pas de sujet, si passionnant soit-il, qui - devenu matière scolaire - ne se mette à ennuyer mortellement les neuf dixièmes des élèves. Quand ils seront obligés de regarder l'atélécole (*a* privatif), ils ne la regarderont plus à la maison, c'est garanti.

Inexistences menacées?

«Pourquoi existe-t-il quelque chose plutôt que rien?» Cette question, chère aux philosophes, nous vaut de leur part une quantité appréciable de papier imprimé. C'est à se demander une fois de plus si, avant de se mettre à réfléchir, ils ont pris la peine de s'informer sur la réalité des faits.

Consultons en effet un catalogue de titres de livres. Qu'apprenons-nous? D'abord que *La mort n'existe pas*, ce qui est un soulagement, mais pas une surprise : les auteurs de ce livre se réclament du spiritualisme -, or leurs ennemis jurés - les rationalistes - avaient, par la plume d'Ernest Kahane, écrit jadis un livre proclamant exactement le contraire: *La vie n'existe pas*! Match nul, donc. Relevons aussi un *Dieu n'existe pas, il l'a toujours dit* - paradoxe d'autant plus spirituel que l'auteur du livre est pasteur. Autre paradoxe, un énorme ouvrageintitulé *La matière n'existe pas*: ce «grand traité sur l'immatérialisme» donne... matière à un pavé de 800 pages. S'il n'y a pas de matière, comment y aurait-il des villes? De fait, le catalogue signale *Lisbonne n'existe pas* et *Corte n'existe plus* et même (ce qui personnellement me trouble plus) *Preuve évidente que Bordeaux n'existe pas* (aux éditions de lHorizon Chimérique). Les arts ne sont pas mieux lotis: *Les mathématiques pures n'existentpas*, proclame un de mes auteurs favoris chez Actes Sud ; *La poésie n'existe pas*, renchérit un autre chez Gallimard. Plus inattendu : un éditeur spécialisé en philosophie, L'Éclat, nous informe que *La volonté de puissance n'existe pas*. Que reste-t-il alors de nos vies? Pas grand-chose. Sachant d'une part que *L'adolescence n'existe pas* (éd. Odile Jacob) et d'autre part que *Demain n'existepas* (par Julien Green, bientôt centenaire), rien d'étonnant à ce que *La personne âgée n'existe pas* (éd. Payot). C'est logique ! Si vous avez des faiblesses, ne vous inquiétez pas, aucune ne peut être bien grave : *Le toxicomane n'existe pas* (éd. Anth ropos), *Les cancres n'existent pas* (Seuil), *Les fautes d'orthographe n'existent pas* (éd. Trédaniel). Ce dernier ouvrage relève du spiritisme, de même que *Le hasard n'existe pas* (éd. Astra). Après cela, des titres comme *Les dragons, ça n'existe pas* ou *Le Père Noël n'existe même pas* paraissent reposants; laissons-les aux petits enfants. Existe-t-il vraiment quelque chose?

Notre ignorance est inepte

On ne peut pas tout savoir. On ne peut pas non plus tout ignorer. Ce qui prouve qu'ignorer est aussi difficile que savoir... Théodore Ivainer et Roger Lenglet proposent un livre un peu décevant, malgré son titre séduisant, *Les ignorances des savants* (éd. Maisonneuve et Larose, 1996). Ils en disent trop sur les ignorances des grands savants, donc pas assez sur ce qui est propre à nous, petits hommes : la vraie ignorance, l'ignorance crasse, celle qui paralyse, empêchant même de bien comprendre leur livre! Ce dernier offre certes de bons morceaux. Par exemple, Newton ignorait la notion de force, Mendel et Darwin celle de vie. Apprenant cela, le lecteur arbore un air supérieur, qui lui est fort agréable : parfait. Mais quand il voit dressée une «typologie des ignorances», son sourire tourne au jaune. Apparemment, il faut être au moins prix Nobel pour mériter d'y figurer. Les auteurs ne jugent pas opportun d'analyser l'ignorance normale, la nôtre. Trop colossale, sans doute. Ainsi averti de sa nullité en ignorance, le lecteur n'a plus qu'à faire confiance aux auteurs. Il regrettera donc, comme eux, que l'analogie, trop souvent, «finisse par s'ontologiser» : puisqu'ils le disent! Et il restera muet d'admiration en les voyant écrire, p. 69 : «Il n'y a pas de niveau zéro de l'iconicité ; au mieux un effort interminable pour s'en approcher. L'énorme mérite de la terminologie des sciences consiste dans cette ascèse qui mène asymptotiquement vers le néant d'une représentation absolument neutre.»

Couper les poires en deux

L'année s'achève, il est temps de décerner les médailles récompensant les exploits qui l'ont marquée. J'en propose une pour *Le Monde*, dans la catégorie «Logique imparable». En gros caractères, le 24 janvier 1997, on lisait ce titre au ton docte, comme seul ce journal sait en honorer ses lecteurs : «La difficulté à cerner le nombre des illettrés obère l'objectif de le faire diminuer de moitié.»

Nul doute que, le progrès des connaissances aidant, l'année 1998 se montrera plus efficace que la précédente, et saura déterminer le nombre exact d'illettrés. Prions le Ciel que ce nombre soit pair. Si par malheur il était impair, il faudrait couper un illettré en deux et n'en alphabétiser que la moitié.

A star is dead

Avoir eu le prix Nobel, et terminer dans les *et caetera*!

Terminer dans les *et caetera* est, je crois, une expression utilisée par les cyclistes. Elle désigne le triste sort promis à un coureur finissant une course trop mal placé pour recevoir une prime : les organisateurs ne prennent pas la peine de déterminer avec précision son classement.

Pierre-Gilles de Gennes et Georges Charpak, tous deux prix Nobel de physique, jouent dans le film *Les palmes de MonsieurSchutz*, d'après la pièce de Jean-Noël Fenwick. Consultons un programme de spectacles. Le film est ainsi présenté : «Comédie française en couleurs de Claude Pinoteau avec Isabelle Huppert, Charles Berling, Philippe Noiret, Christian Charmetant.» Mais... mon Dieu, regardons bien, regardons mieux! Pas de doute : moins délicats encore que des organisateurs de courses cyclistes, les annonceurs vont jusqu'à omettre le symbole *etc* qui rappellerait que ces vedettes de l'écran ne sont pas seules à jouer dans le film.

Avoir eu le prix Nobel, et ne même pas terminer dans les *et caetera*!...

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

Histoires de science

J'ai lu tout le mal que Jean-Louis Fischer pense du livre de Jacques Gonzalès *Histoire naturelle et artificielle de la procréation* (voir *Analyses de livres*, *Pour la Science*, août 1997). Évoquant les mânes de Roger et de Canguilhem, J.-L. Fischer voue aux gémonies ce médecin enseignant qui, pour la raison qu'il n'est pas historien de la médecine, pille sans vergogne et sans critique une littérature secondaire dont il ne sait pas apprécier la valeur. Il généralise ses remontrances aux auteurs qui «se forgent un habit d'historien des sciences de la vie et de la médecine, sous le seul prétexte que, spécialistes d'une discipline, ils pensent pouvoir en écrire l'histoire...»

Du particulier, J.-L. Fischer passe au général : «On ne peut empêcher les auteurs d'écrire des livres d'histoire des sciences, ni les éditeurs d'éditer des ouvrages dans cette discipline, mais les uns et les autres doivent savoir qu'il existe des professionnels de l'histoire des sciences et que ceux-ci ont notamment pour tâche d'éviter les lieux communs et la propagation des erreurs.»

Chimiste de formation (personne n'est parfait), je suis aussi depuis une dizaine d'années, ce que j'oserais appeler avec prudence un «chimiste historien». Grâce à J.-L. Fischer, je comprends maintenant les conditions lamentables de mon activité jusqu'à ce jour, et j'ai grande honte des erreurs et des lieux communs dont j'ai été responsable. Je demande donc à la communauté des «professionnels de l'histoire des sciences» de réagir et d'imposer aux scientifiques qui prétendent faire l'histoire de leur discipline, l'obtention d'un label de qualité, du type «approuvé par», qui a tant fait pour la réputation des bonnes lessives.

Georges BRAM, Orsay

Réponse de Jean-Louis Fischer

L'histoire des sciences connaît en France de nombreux problèmes. Quand on ne la rejette pas, la jugeant inutile, ou quand on n'en fait pas une affaire personnelle, on en fait une sous-discipline : l'historien y voit une branche de l'histoire, le philosophe la fait fonctionner dans l'épistémologie philosophique, le sociologue se débat pour qu'elle se résolve dans l'explication d'une anthropologie sociale.

Je suis, avec d'autres collègues, pour que l'histoire des sciences soit reconnue comme une discipline à part entière, qu'elle ait sa place dans les enseignements universitaires et les institutions de recherche, et qu'elle devienne une discipline de rassemblement. Pluridisciplinaire dans ses matières, l'histoire des sciences doit être plurielle dans ses approches intellectuelles. La réalisation de son unité ne dépend pas seulement d'un débat intellectuel, mais aussi d'une volonté politique. Rêvons un instant : le jour où cette unité sera réalisée, que le CNRS aura une commission «Histoire des sciences», qu'il y aura des lieux de formation dans la discipline, les mentalités changeront. On ne dira plus, comme G. Bram, «chimiste historien» mais, comme cela se fait déjà, «historien de la chimie».

Cheminées de sable

Comment les curieux cylindres verticaux de quelques décimètres de diamètre que l'on observe dans certains sables dunaires consolidés se sont-ils formés ? Roland Paskoff (voir *Cheminées de sables*, *Pour la Science*, septembre 1997) suggère que ces structures résultent de la présence sur la dune d'arbres, au-dessous desquels l'eau d'infiltration serait acidifiée et capable de dissoudre le ciment calcaire des sables.

Cette hypothèse rencontre deux objections. D'abord, les racines de ces arbres auraient plutôt laissé des traces sous la forme de concrétions racinaires que de cylindres décalcifiés. Ensuite, des travaux récents révèlent que, contrairement à ce qui était communément admis, dans les sables dunaires l'humidité ne se propage pas selon un front parallèle à la surface. J. S. Selker, de l'Université Corvallis, ainsi que R. S. Baker et D. H. Hillel, de l'Université du Massachusetts, par exemple, ont montré en laboratoire que la diffusion de l'eau dans les sables prend parfois l'allure de cylindres verticaux, des «doigts». Plus récemment, C. J. Ritsema et R. N. Dekker, de Wageningen, travaillant en Hollande et dans l'Ouest américain, et une équipe sino-suédoise en Asie centrale, ont suivi sur le terrain la pénétration de l'eau à l'intérieur de dunes dépourvues de végétation et ont observé le même phénomène.

À l'échelle des grains de sable, la conductivité hydraulique ne semble pas uniforme, mais fortement dépendante de l'humidité, d'autant plus que le sable est sec. Ainsi, après chaque pluie, l'eau se propagerait en accentuant les différences en faveur des zones déjà les plus humides. Sous l'action de la pesanteur, l'eau se concentrerait alors suivant des conduits verticaux, qui faciliteraient sa progression vers les nappes aquifères intradunaires. Un tel mécanisme se développerait dès l'immobilisation des dunes, en l'absence de végétation arbustive. Celle-ci en privilégiant la circulation de l'eau le long des racines tendrait à perturber le développement de ces cheminées de sable.

Pierre ROGNON, Paris

Réponse de Roland Paskoff

Les expériences de laboratoire que cite P. Rognon ont été réalisées sur des sables meubles, et non sur des sables consolidés en grès comme ceux où des cheminées ont été observées. L'analogie est donc discutable. Quand à la présence de racines dans les grès dunaires, elle est attestée par des fourreaux calcaires qui en sont le moulage.

Coulées décalées

L'article de Philippe Coussot *Les coulées de boues* (voir *Pour la Science* octobre 1997) rappelle fort justement des catastrophes liées à ces phénomènes et en explique les mécanismes. Toutefois, la coulée de boue qui, empruntant le lit du Bonrieux, détruisit plus de 20 maisons du village de Bozel en quelques minutes le 16 juillet 1904, s'est produite en Savoie et non en Isère.

Alexandre DOGLIONI, Saint-Pierre de Genebroz

Épidémies anciennes et SIDA

Dans l'article de Stephen O'Brien et Michael Dean *Pourquoi certaines personnes résistent au SIDA* (voir *Pour la Science*, octobre 1997), l'encadré *Épidémie au Néolithique* confirme les théories que je développe depuis plusieurs années. L'humanité des premiers agriculteurs qui a domestiqué les plantes et les animaux sauvages depuis plus de 10 000 ans avant notre ère, à partir de plusieurs zones tel le Croissant fertile, aurait été touchée par de très graves épidémies de maladies infectieuses aiguës, certainement nouvelles, issues de souches microbiennes et virales animales.

Le sommet de ces graves pandémies se situe, à mon avis, vers le milieu du troisième millénaire avant notre ère : l'augmentation considérable de la mortalité à partir du début du troisième millénaire, indiquée en particulier par l'augmentation du nombre des sépultures collectives, ainsi que par leur implantation et leur mode d'utilisation, ne correspond pas à un boom démographique mais plutôt à une série d'hécatombes épidémiques. Étant donné la courbe de natalité des paysans néolithiques, leur sédentarisation de plus en plus marquée et leur méconnaissance de

méthodes de contraception efficaces, le peuplement de l'Europe aurait dû être beaucoup plus important à cette époque. Seule l'hypothèse des épidémies explique ce «vide» de peuplement.

Une grande majorité des souches bactériennes ou virales responsables de ces épidémies ont un équivalent animal. En outre, 90 pour cent du cheptel domestique des néolithiques est porteur de germes occasionnant des épidémies humaines : variole, grippe, fièvre de Malte, tuberculose, salmonelloses diverses, voire syphilis. Le confinement des animaux sauvages, nouvellement domestiqués, dans des enclos et des étables aurait favorisé l'émergence de souches agressives pour l'homme. L'homme néolithique a certainement été, en quelques millénaires, rattrapé par une pathologie infectieuse animale sous-jacente. Les effets de la sédentarisation, l'augmentation des échanges, les trocs de cuir ou de peaux, les rassemblements d'ordre cultuel ont dû favoriser la propagation des épidémies.

Jean ZAMMIT, Caraman

Europanto, espéranto

L'europanto, langue composite qui mélangerait toutes les langues de l'Union européenne (Voir *Les langues du monde*, *Dossier hors-série Pour la Science*, octobre 1997), est-il d'utilisation plus facile que l'espéranto ? Il est vrai que l'espéranto nécessite un apprentissage mais, pour comprendre l'europanto, l'on doit posséder de bonnes connaissances de français, d'anglais, d'allemand, d'italien, d'espagnol, voire de néerlandais !

Si l'europanto, né d'une blague de fonctionnaire européen, semble susciter autant d'intérêt, c'est qu'il répond à une nécessité : celle de doter l'Union européenne d'une langue neutre, supra nationale, relativement simple à maîtriser, afin de permettre le dialogue dans le respect mutuel de la langue et de la culture de chacun. L'espéranto apportera-t-il la solution ? En tous cas, de plus en plus de parlementaires européens s'y intéressent.

Germain PIRLOT, Ostende

L'art du tri

Divers lecteurs ont proposé des solutions à l'un ou l'autre des problèmes du tri d'un jeu de cartes (voir *L'art du tri*, *Pour la Science*, octobre 1997). J'ai étudié leurs propositions et elles m'ont conduit à la mise au point de deux solutions générales, finalement assez simples. Je remercie Vincent Moresmau, Pierre Ghienne, Christophe Meessen, Fabien Marson, Philippe Monteil, O. Temmem, et surtout M. Gasnier à qui on doit l'étonnante découverte de l'utilisation des codes de Gros-Gray.

Rappelons que le problème du tri sans retournement est de classer un jeu de cartes en ne faisant qu'une succession de *séparations en deux* du paquet : on prend le paquet de cartes faces en haut et on fait glisser les cartes sur une table, soit à droite, soit à gauche pour constituer deux nouveaux paquets qu'on regroupe en plaçant le paquet de droite sur celui de gauche (sans retourner les paquets pour minimiser les gestes), avant de recommencer une séparation, etc. Avec un jeu de 32 cartes, j'indiquais une méthode aboutissant à un paquet entièrement trié en cinq étapes. Et je posais le problème de savoir comment généraliser la solution pour un jeu de 52 cartes.

Le problème du tri par séparation *sans table* est semblable avec la seule différence que lors d'une séparation on se contente maintenant de faire passer les cartes de la main gauche à la main droite en plaçant les cartes soit au-dessus, soit au-dessous de celles qui sont à droite. Là encore, pour ce problème un peu plus difficile, j'indiquais une méthode en cinq passages et je demandais aux lecteurs de trouver une généralisation pour le jeu de 52 cartes.

Voyons d'abord la solution générale pour le tri sans retournement. Pour trier un jeu de c cartes, on associe à chaque carte son numéro (un entier entre 0 et c-1) et on l'écrit en binaire $a_n a_{n-1} \ldots a_2 a_1$. Le nombre n de chiffres binaires utilisés est le plus petit entier n tel que $2^n \geq c$; pour 32, on trouve $n = 5$, pour 52 on trouve $n = 6$. Si n est impair, on change les chiffres de rang pair (a_2, a_4, a_6, ...) en leur complément ('0' devient '1' et '1' devient '0'), ce qui donne pour chaque carte une suite $b_n b_{n-1} \ldots b_2 b_1$ de '0' et de '1', qu'on peut écrire sur les cartes. Lorsque n est pair, on change les chiffres de rang impair. L'algorithme de tri sans retournement comporte alors n étapes :

– Étape 1 : placer les cartes telles que b_1 vaut 1 à gauche, et celles où b_1 vaut 0 à droite ;

– Étape 2 : placer les cartes telles que b_2 vaut 1 à gauche, et celles où b_2 vaut 0 à droite ; etc.

Pour le tri sans table, la méthode est la même sauf que, maintenant, on numérote les cartes en ordre inverse (la dernière a le numéro 0, l'avant-dernière le numéro 1, etc.) et que la suite $b_n b_{n-1} \ldots b_2 b_1$ associée à chaque carte est le code de Gros-Gray (voir *Voyageurs et baguenaudiers*, *Pour la Science*, août 1997) de son numéro. Les étapes du tri sont :

– Étape 1 : placer les cartes telles que b_1 vaut 1 au-dessus, et celles où b_1 vaut 0 en dessous ;

– Étape 2 : placer les cartes telles que b_2 vaut 1 au-dessus, et celles où b_2 vaut 0 en dessous ; etc.

Cette nouvelle utilisation du code de Gros-Gray dans un contexte de tri de cartes m'a émerveillé, et j'ai été très surpris de la coïncidence qui a fait que la solution générale au problème que je posais au mois d'octobre ait eu sa clef dans l'article publié deux mois avant.

Il faut noter que les tris présentés fonctionnent pour des jeux complets, mais aussi pour des jeux incomplets ou ayant des cartes répétées. Leur utilisation pour le classement de données est donc envisageable et pourrait, dans le cas de certains ordinateurs à architecture parallèle, avoir un intérêt pratique. Les démonstrations que les méthodes proposées fonctionnent correctement se font par des raisonnements par récurrence sans difficultés particulières. La difficulté était d'imaginer les méthodes ! Merci aux lecteurs.

Jean-Paul DELAHAYE

Addendum et erratum : Internet

Les références bibliographiques des travaux universitaires évoqués dans la chronique de Christian Walter, *Science et finances* sont disponibles sur le site Internet de *Pour la Science* à l'adresse : http://www.pourlascience.com.

Une inversion de fichiers informatiques a conduit à la publication d'erreurs dans l'article de Mylène Garrigues *L'avenir du texte* (voir *Les langues du monde*, *Dossier hors série Pour la Science*, octobre 1997). La rédaction présente ses excuses à l'auteur et aux lecteurs, qui trouveront une version exacte de ce texte sur le site Internet de *Pour la Science* à l'adresse :

http://www.pourlascience.com.

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique. Courrier électronique : 101641.3525@compuserve.com. Retrouvez la Tribune sur l'Internet à l'adresse : http://www.pourlascience.com

Les scientifiques étrangers

ANTONY MAUVAIS

La France doit apprendre à les accueillir.

Comme tous les pays industrialisés, la France a un besoin vital des chercheurs étrangers, qui viennent travailler quelque temps dans nos laboratoires : même si le niveau scientifique de notre pays tient d'abord au budget qu'il y consacre ainsi qu'aux compétences indéniables de nos chercheurs, les échanges de chercheurs sont une clé de la réussite scientifique et technique, parce que les conférences, les publications et les échanges par le réseau *Internet* ne suffisent pas à transmettre les connaissances nouvelles. Une communauté scientifique et technique de haut niveau se développe par des contacts personnels, au cours desquels se confrontent les idées ou se montrent des «gestes», des tours de main, comme chez les Compagnons du Tour de France. La présence de chercheurs étrangers de haut niveau dans les équipes de recherche d'un pays est un bon indice de rayonnement scientifique. De surcroît, l'exemple de pays voisins démontre que ces échanges scientifiques sont un bon investissement, parce qu'ils débouchent souvent sur des développements économiques.

En conséquence, les ministères des affaires étrangères et de la recherche, ainsi que le CNRS, l'INSERM ou les universités, consacrent des sommes importantes à l'invitation des chercheurs étrangers de niveau postdoctoral. Les quelques milliers de chercheurs qui visitent ainsi les laboratoires français, chaque année, viennent principalement des pays industrialisés, pour des durées de quelques mois à quelques années, généralement pour un an. Ils sont souvent jeunes, et ils ne constituent pas une «menace pour l'emploi», car ils retournent le plus souvent dans leur pays (pourtant ce serait parfois notre intérêt de nous les attacher définitivement !).

Ces invités sont-ils bien reçus ? Restent-ils suffisamment en contact avec les milieux scientifiques français ? La consultation d'un grand nombre de nos anciens invités a donné des résultats préoccupants : si nos hôtes ont gardé de leur collaboration avec nos équipes un excellent souvenir, et s'ils ont maintenu avec leurs collègues français des relations personnelles et professionnelles fécondes, notre bureaucratie est fréquemment fustigée : «J'ai très difficilement obtenu des visas pour ma femme, mes deux enfants et moi-même. Le Consulat m'a fait remplir le même formulaire en six exemplaires, pour chacun de nous quatre, et il a refusé que je produise des photocopies. Comme il fallait, en outre, que les formulaires soient en français, j'ai dû payer un traducteur. Après cet exercice de calligraphie imposée, nous n'avons reçu que des visas temporaires, et nous avons dû reprendre les formalités à notre arrivée en France.» «J'ai dû aller faire la queue à quatre heures du matin, dans la pluie, afin d'obtenir une carte de séjour. On me l'a mal faite, de sorte que j'ai dû y retourner trois fois. C'était insultant et stupide.» «Mes mésaventures avec l'administration ont été enregistrées et envoyées à l'Ambassade de France. Il y a quelques semaines, un collègue m'a demandé si je recommandais une année sabbatique en France : j'ai dit oui, avec réserves. Ces dernières tenaient à l'inefficacité et à l'opacité de l'administration française, qui gêne beaucoup les visiteurs.»

Comment tolérer que les difficultés matérielles anéantissent les trésors d'énergie déployés par ailleurs... parfois par les administrations, pour faire venir les chercheurs dont la France a besoin. Alerté, le gouvernement a fait suivre les lois Pasqua sur l'immigration d'une Circulaire Pasqua-Veil, adressée à tous les préfets et qui leur demandait de désigner un correspondant qui réglerait les difficultés éventuelles.

Comment obtenir que soient suivies les recommandations de cette circulaire ? Comment informer avec précision ces scientifiques étrangers, et leurs collègues français qui les invitent, sur les formalités qu'ils ont à accomplir ? La Fondation Kastler, créée par l'Académie des sciences et quelques partenaires, s'est attelée à cette tâche.

En réalité, la situation doit s'améliorer de deux façons. Tout d'abord, pour que les chercheurs – nos invités et leurs hôtes français – règlent sereinement les formalités administratives, nous avons réalisé un *Guide des formalités administratives* : les formalités sont mieux maîtrisées grâce à une collaboration efficace et suivie avec tous les services administratifs concernés.

Toutefois ce premier travail est insuffisant : nous cherchons aujourd'hui à établir, dans les principales métropoles scientifiques, des bureaux d'accueils afin de résoudre les problèmes rencontrés par les invités ou par les chercheurs français qui veulent inviter des collèges. Une *Carte de Chercheur Invité* faciliterait l'installation de nos invités et permettrait aussi que soit établi le recensement de ceux-ci, condition indispensable à l'établissement de relations de suivi efficaces avec eux, après leur retour dans leur pays.

En effet, ces scientifiques qui ont fait chez nous des séjours utiles pour leur carrière ultérieure sont souvent, quand nous avons maintenu le contact avec eux, de bons ambassadeurs de notre pays : c'est avec eux en priorité, après qu'ils auront regagné leur pays pour y occuper des fonctions clés, que nous aurons à collaborer à nouveau, dans le domaine scientifique évidemment, mais aussi sur les plans technique, commercial, économique ou politique.

D'autres pays industrialisés ont souvent pris de l'avance dans l'établissement de telles relations ; sous peine d'être laissée pour compte, la France doit réagir. Un scientifique que nous aurons bien accueilli et avec lequel nous aurons établi après son retour des relations suivies et amicales aura à cœur de promouvoir la culture et l'économie de notre pays.

Antony MAUVAIS est secrétaire général adjoint de la Fondation nationale Alfred Kastler de l'Académie des Sciences.

Irène Joliot-Curie

PIERRE RADVANYI

Réservée, mais passionnée par ses recherches, elle découvre la radioactivité artificielle avec Frédéric Joliot. Elle sera secrétaire d'État sans avoir le droit de vote.

Les dynasties de scientifiques sont rares, celles de prix Nobel sont l'exception. Ce fut pourtant le cas d'Irène Joliot-Curie, fille aînée de Pierre et de Marie Curie, née le 12 septembre 1897, au domicile familial, rue de la Glacière, dans le XIIIe arrondissement de Paris. «Aussitôt rétablie, écrira sa mère, je repris le travail de laboratoire avec l'intention de préparer une thèse de doctorat» ; travail de thèse qui conduira Marie et Pierre Curie à la découverte du polonium et du radium, en 1898.

Pierre Curie meurt accidentellement en 1906. Irène n'a pas encore neuf ans. Elle subira l'influence de son grand-père, le médecin Eugène Curie, qui vient vivre chez Pierre et Marie Curie à partir de 1898. À partir de ses 10 ans, et pendant deux années, elle suivra les cours dispensés dans le cadre d'une «coopérative éducative» fondée par sa mère et par quelques amis : Marie Curie enseigne la physique, Paul Langevin les mathématiques et Jean Perrin la chimie.

En août 1914, au début des hostilités, elle écrit, de Bretagne où elle est en vacances, à sa mère rentrée à Paris : «Si tu te décides à rester à Paris et à me permettre de te rejoindre, tâche de savoir ce que je pourrais faire. Je sais par les journaux qu'il y a les cours des Femmes de France pour former rapidement des aides infirmières, mais je ne sais pas si on y accepterait une jeune fille de mon âge ...». Elle a tout juste 17 ans. Aussi, tout en préparant une licence de physique et de mathématiques à la Sorbonne, elle seconde Marie Curie comme infirmière radiologiste, pour l'installation et la mise au point d'unités radiographiques mobiles dans la zone du front et pour l'instruction de manipulatrices.

Elle racontera dans un article publié en 1954 dans la revue *Europe* : «Dès les premiers jours de la guerre, ma mère s'aperçut que les appareils à rayons X, déjà assez employés par les médecins civils, étaient à peu près inconnus dans le service de santé militaire. Avec la même énergie avec laquelle elle avait décidé de traiter des tonnes de minerai sans aucun moyen matériel à sa disposition, elle décida [...] d'équiper des voitures et de se procurer des appareils transportables pour radiographier les blessés.[...] Ma mère m'apprit à me servir des appareils, [...] et m'emmena comme manipulatrice dans plusieurs de ses expéditions, entre novembre 1914 et mars 1915. Ensuite, les besoins en personnel augmentant, [...] ma mère, qui ne doutait pas plus de moi qu'elle ne doutait d'elle-même, n'hésita pas à me laisser seule, âgée de 18 ans, avec la responsabilité du service de radiographie, dans un hôpital anglo-belge, à quelques kilomètres du front, près d'Ypres, avec en plus la tâche peu aisée d'enseigner les méthodes de localisation des projectiles à un médecin militaire belge, ennemi des notions les plus élémentaires de géométrie». En effet, les radiologues prenaient des clichés de face et de profil des blessés, et quelques transformations géométriques leur permettaient de localiser précisément les éclats d'obus avant l'intervention du chirurgien.

Association Curie et Joliot-Curie

Irène et sa mère Marie Curie, à l'Institut du radium, en 1921.

LES DÉBUTS À L'INSTITUT DU RADIUM

Elle sera une compagne et une aide pour sa mère, avant de devenir son assistante à l'Institut du radium. La paix revenue, Irène Curie commence à travailler à l'Institut du radium, qui vient d'être achevé et qui est dirigé par Marie Curie (aujourd'hui, il fait partie intégrante de l'Institut Curie). Toute sa carrière scientifique s'y déroulera, jusqu'aux dernières semaines de sa vie.

Physicienne et chimiste, elle s'intéresse à la fois aux propriétés physiques et chimiques des éléments radioactifs, ou radioéléments, et à leurs applications. Elle signera toutes ses publications scientifiques Irène Curie, même après son mariage. Sa thèse de doctorat, soutenue en 1925, porte sur les caractéristiques des particules alpha émises par le polonium, sur les oscillations de leur parcours dans les gaz et sur les variations de leur pouvoir ionisant le long de leurs trajectoires. Le polonium émet des particules alpha et, pour les détecter, Irène utilise notamment une chambre à brouillard de Wilson : lorsque des particules traversent ce dispositif, elles font apparaître des gouttelettes le long de leurs trajectoires. On déduit de ces trajectoires diverses caractéristiques physiques du ralentissement de ces particules dans le gaz qui remplit la chambre. Les reconstitutions géométriques dans

l'espace des trajectoires matérialisées dans la chambre de Wilson devaient lui rappeler l'analyse des radiographies qui permettaient de localiser les éclats d'obus chez les blessés, pendant la guerre.

En 1923, Frédéric Joliot sort major de l'École de physique et chimie industrielles ; son directeur, Paul Langevin, le présente à Marie Curie, qui l'engage immédiatement comme préparateur particulier. En 1926, Irène épouse Frédéric ; ils collaborent étroitement de 1928 à 1935. Elle est timide, d'une grande simplicité, d'un abord distant en apparence ; lui est séduisant, inventif et brillant. Ils ont le même goût pour les activités sportives et pour la nature, ils partagent la même passion pour la recherche scientifique, les mêmes opinions sur la justice et le progrès social. Ils auront deux enfants, Hélène, née en 1927, et Pierre, né en 1932.

Frédéric et Irène Joliot-Curie mettent au point des procédés de préparation de sources de polonium très intenses, émettrices de particules alpha, concentrées sur de petites surfaces. Pour ce faire, ils utilisent le radium D patiemment accumulé par Marie Curie et par eux-mêmes. Le radium D, assez stable puisque sa période est égale à 22 ans, se transforme en se désintégrant en polonium (dont la période est égale à 138 jours). Irène et Frédéric préparent des solutions de polonium qu'ils déposent sur une feuille. Le solvant s'évapore et laisse sur le support du polonium concentré émetteur de particules alpha. Ils disposent ainsi de sources intenses de ces particules, qu'ils vont utiliser dans leurs expériences.

Association Curie et Joliot-Curie

Pour préparer des sources intenses de particules alpha, Irène et Frédéric Joliot aspirent une solution de polonium au moyen d'une pipette et la déposent sur un support ; le liquide s'évapore et laisse un amas de polonium qui émet des particules alpha.

LA DÉCOUVERTE MANQUÉE DU NEUTRON

A la fin de 1931, Irène étudie avec Frédéric le rayonnement extrêmement pénétrant observé l'année précédente, à Berlin, par W. Bothe et H. Becker, lors de l'irradiation du béryllium ou du bore par des particules alpha. Grâce à leurs sources intenses de particules alpha, les deux chercheurs de l'Institut du radium découvrent, en janvier 1932, que ce rayonnement pénétrant a la propriété d'éjecter des protons très rapides quand il traverse une substance hydrogénée telle que la paraffine ou la cellophane ; ils pensent qu'il s'agit de rayons gamma d'énergie très élevée. Ils sont perplexes et s'interrogent sur l'origine d'une telle énergie. Ils ne pensent pas que ces rayonnements sont un nouveau type de particules. Leur expérience est reproduite un mois plus tard par James Chadwick, à Cambridge ; c'est lui qui découvre le neutron, particule sans charge, dont la masse est voisine de celle du proton. Ce sont ces «billes», et non un rayonnement gamma de haute énergie, qui éjectaient les protons. Bien qu'ils y aient contribué, les Joliot ont manqué la découverte du neutron, et nous verrons que la même situation se reproduira pour Irène, lors de la découverte de la fission.

En 1933, peu après la découverte de l'électron positif, ou positon, par l'Américain C. Anderson, Frédéric et Irène Joliot-Curie observent dans leur chambre à brouillard, en même temps que des équipes anglaise et allemande, que les rayons gamma de grande énergie se matérialisent dans un écran de plomb en créant des paires d'électrons positifs et négatifs.

C'est à cette époque qu'ils découvrent la radioactivité artificielle : ils bombardent une feuille d'aluminium avec les particules alpha d'une de leurs sources intenses de polonium et constatent un excès de positons. Ils pensent d'abord que ces électrons positifs sont produits dans une réaction nucléaire et cherchent à déterminer, à l'aide d'un compteur Geiger-Müller, l'énergie minimum des particules alpha à partir de laquelle ils apparaissent.

En janvier 1934, ils découvrent que l'émission des positons décroît lentement, avec une période d'environ trois minutes, dés que la feuille d'aluminium n'est plus soumise au bombardement des particules alpha. En bombardant les atomes d'aluminium, ils ont créé de nouveaux noyaux radioactifs d'une espèce encore inconnue, des noyaux de phosphore 30, isotope radioactif du phosphore 31. Cette nouvelle sorte de désintégration radioactive conduit au silicium 30 stable par émission de positons. Deux semaines plus tard, ils démontrent chimiquement que c'est bien du phosphore radioactif qui a été formé dans l'aluminium. Ils ont découvert la radioactivité artificielle.

LA RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE

Le jeune couple de savants montre ainsi que la radioactivité est un phénomène beaucoup plus général que ne l'avaient imaginé Pierre et Marie Curie 35 ans auparavant.

Frédéric Joliot racontera plus tard : «Marie Curie a été témoin de nos recherches, et je n'oublierai jamais l'expression de joie intense qui s'est emparée d'elle lorsque Irène et moi lui avons montré, dans un petit tube de verre, le premier radioélément artificiel. Je la vois encore, prenant entre ses doigts, déjà brûlés par le radium, ce petit tube de radioélément, d'activité encore bien faible. Pour vérifier ce que nous lui annoncions, elle l'approcha d'un compteur Geiger-Müller et elle put entendre les nombreux tops du numérateur de rayons. Ce fut sans doute la dernière grande satisfaction de sa vie. Quelques mois plus tard, Marie Curie décédait d'une leucémie.»

La découverte de la radioactivité artificielle n'a pas eu seulement une très grande importance pour la science de la radioactivité et la physique nucléaire. Elle a conduit également à des développements et à des applications considérables en astrophysique, en chimie et dans l'in-

dustrie ; la radiothérapie a commencé à utiliser de nouvelles sources de rayonnement, tel le radiocobalt. On obtint des indicateurs radioactifs de tous les éléments chimiques, ce qui favorisa l'essor de la biologie, de la pharmacologie et des méthodes de diagnostic médical. Frédéric et Irène Joliot-Curie reçurent le prix Nobel de chimie de 1935 pour leur découverte de la radioactivité artificielle.

Après leur découverte, les deux chercheurs se voient confier diverses fonctions et responsabilités. Frédéric devient professeur au Collège de France et prend la direction de deux laboratoires. En 1936, Irène entre avec deux autres femmes dans le gouvernement de Front populaire de Léon Blum (alors que les femmes n'ont pas encore le droit de vote !). Elle devient, de juin à septembre, le premier sous-secrétaire d'État à la Recherche scientifique ; à l'automne, elle démissionne, passant, comme il était convenu, le flambeau à Jean Perrin, pour reprendre ses activités de recherche et d'enseignement. En 1937, elle devient maître de conférences, puis professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Paris.

Association Curie et Joliot-Curie

Irène Joliot-Curie, dans son laboratoire de chimie, en 1946.

A QUELQUES PAS DE LA FISSION

A la suite de la découverte de Frédéric et Irène Joliot-Curie, Enrico Fermi et son équipe, à Rome, découvrent un grand nombre de radioéléments artificiels en bombardant tous les éléments chimiques connus avec des neutrons (lesquels, étant neutres, pénètrent facilement dans les noyaux, même lourds). Ce faisant, ils observent dans l'uranium, le plus lourd des éléments, plusieurs activités nouvelles qu'ils attribuent à des éléments qui n'existent pas dans la nature et qu'ils nomment transuraniens. À Berlin, Lise Meitner, Otto Hahn et Fritz Strassmann reprennent cette étude et identifient neuf nouveaux transuraniens.

En 1937, Irène Joliot-Curie et le physicien yougoslave Paul Savitch bombardent de l'uranium avec des neutrons et identifient un nouveau radioélément (le $R_{3,5h}$) en suivant son rayonnement à travers un écran de cuivre épais ; sa période est égale à 3,5 heures, et ses propriétés ressemblent à celles des terres rares. Ils se demandent s'il ne s'agit pas d'un isotope de l'actinium, mais tel ne paraît pas être le cas ; serait-ce un transuranien de plus ? Ils écrivent, en juillet 1938 : «Dans l'ensemble, les propriétés de $R_{3,5h}$ sont celles du lanthane, dont il semble jusqu'ici qu'on ne puisse le séparer que par fractionnement.» Sans le savoir, ils sont très près de la vérité.

En lisant leur publication, Strassmann et Hahn se demandent si $R_{3,5\,h}$ n'est pas mélangé avec un isotope du radium. Les deux chimistes allemands reprennent leurs séparations chimiques pour rechercher du radium dans l'uranium irradié par les neutrons. Ils croient mettre en évidence plusieurs isotopes du radium ; mais, en vérifiant rigoureusement leurs résultats, ils découvrent, en décembre 1938, qu'il s'agit d'un élément beaucoup plus léger, le baryum, se désintégrant en lanthane. Ils montrent ainsi qu'un neutron peut casser un noyau d'uranium en deux noyaux plus petits. C'est la découverte de la fission. Ainsi, Irène Joliot-Curie avait bien observé du lanthane, mais des traces d'yttrium, de même période que le lanthane, perturbaient les résultats.

A partir des années 1930 et jusqu'à la fin de sa vie, Irène est victime d'attaques de tuberculose qui l'obligent à plusieurs séjours en sanatorium. Après la mort de Marie Curie, elle devient membre permanent du conseil de la Fondation Curie (aujourd'hui l'Institut Curie). De 1946 à 1951, elle est l'un des commissaires à l'Énergie atomique, auprès du haut-commissaire Frédéric Joliot, et est chargée plus particulièrement de suivre les questions de prospection géologique et de matières premières.

En 1946 également, à la suite d'André Debierne, elle devient professeur titulaire de la chaire de physique générale et radioactivité de la Faculté des sciences de Paris et directrice du laboratoire Curie de l'Institut du radium. Dès 1942, elle avait plaidé pour une extension de l'université vers la vallée de Chevreuse. Au début des années 1950, elle découvre, à Orsay, un site approprié à la réalisation d'un complexe de laboratoires qui sera à l'origine de l'Université Paris-Sud. Elle obtient les crédits nécessaires à la construction et à l'équipement d'un laboratoire de physique nucléaire, où sera transféré l'essentiel des activités du laboratoire Curie et du laboratoire de Frédéric Joliot du Collège de France.

Irène Joliot-Curie meurt à Paris, le 17 mars 1956, d'une leucémie subaiguë consécutive à ses travaux et à l'exposition aux rayons X subie pendant la guerre de 1914-1918. Des obsèques nationales sont décrétées.

Profondément imprégnée d'un idéal laïque et républicain, elle est souvent intervenue pour les droits des femmes, pour le progrès social, contre le fascisme, puis contre la course aux armements nucléaires. A maintes reprises au cours de sa vie, elle a souligné l'importance de la recherche fondamentale et de l'enseignement des sciences pour tous.

A l'initiative de l'Association Curie et Joliot-Curie, un hommage a été rendu à Irène Joliot-Curie à l'occasion du centième anniversaire de sa naissance. Cette cérémonie s'est déroulée à l'Institut Curie, à Paris, le mardi 25 novembre, sous le haut patronage et avec la participation de Claude Allègre, ministre de l'Éducation nationale, de la recherche et de la technologie. Georges Charpak a évoqué l'œuvre scientifique d'Irène Joliot-Curie.

Pierre RADVANYI, directeur de recherche émérite au CNRS, au Laboratoire national Saturne, à Saclay, est le secrétaire général de l'Association Curie et Joliot-Curie

Les fractales et la Bourse

BENOIT MANDELBROT

Comment modéliser les fluctuations de la Bourse par une transformation géométrique très simple.

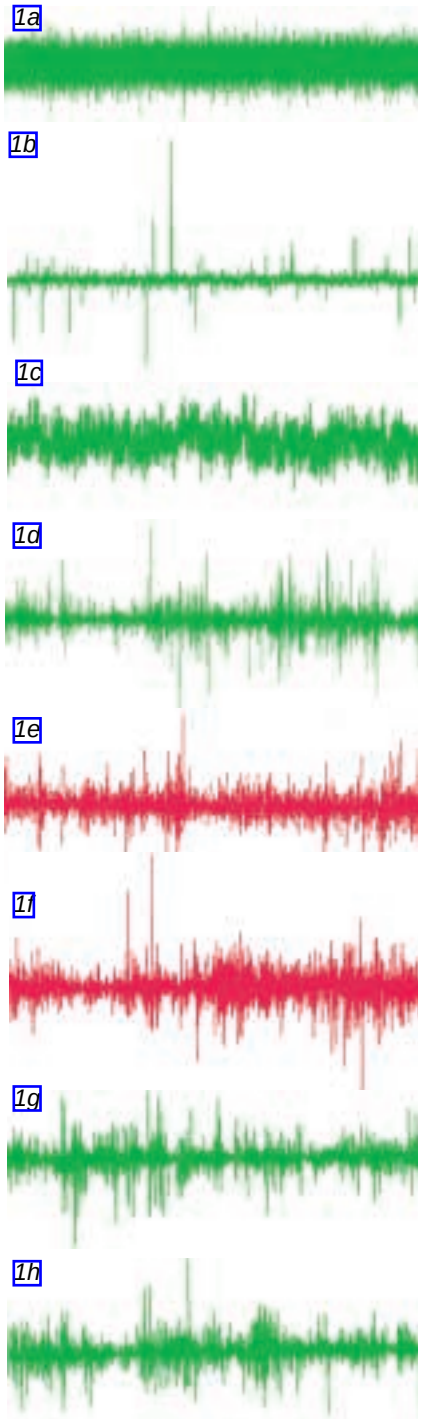
Regardons les diagrammes ci-contre. Certains sont des chroniques de changements successifs d'un prix coté en Bourse, d'autres sont des simulations réalisées à partir de modèles : l'objet des simulations est de saisir au moins une parcelle de la réalité des cours de bourse afin de l'analyser.

Une telle analyse intéresse l'économiste, qui cherche à comprendre la nature des marchés, l'assureur, qui cherche à diminuer les risques, et le spéculateur, qui cherche à mettre les risques à son service. Pour atteindre ces buts, une condition reste incontournable : il faut décrire la réalité. Or on ne connaît que ce que l'on sait imiter, ce qui explique les grands investissements de la société dans la recherche de modèles performants.

Les mots précédents ne suscitent aucune controverse, mais l'appel aux images n'est pas typique des sciences dites «dures», ni de celles qui aspirent à le devenir. L'idéal classique est de tout réduire à l'analyse mathématique et à la mesure d'un petit nombre de paramètres caractéristiques. Pour les buts de cette chronique, tout au contraire, l'œil est un instrument indispensable qui mérite qu'on lui redonne son importance, tout au moins dans les premiers stades des théories. Cette foi dans les vertus de l'apparence a prouvé sa richesse et son efficacité : l'étude des fractales a été prolongée et appliquée dans tous les domaines scientifiques. Dans le cas des bourses, la même vision suggère que, pour juger de la valeur d'un modèle, il est bon d'examiner attentivement les courbes qu'il produit.

Les images représentant (ou imitant) les prix eux-mêmes ne disent pas grand-chose, et nul ne doute que les images puissent tromper. Mais on peut de même être trompé par les mots et même par les formules statistiques lorsqu'on les applique là où elles ne sont pas appropriées.

Le hasard n'est pas unique et se présente sous trois formes distinctes au moins. Le hasard usuel, celui des tirages à pile ou face, est «bénin», tandis que tout suggère que la Bourse est soumise à une forme «sauvage» de hasard. La différence notable entre ces types de hasard est que nombre des outils statistiques actuels ne sont applicables qu'au hasard bénin. Donc, sans laisser le dernier mot à l'œil (ne serait-ce justement que parce qu'il ne s'exprime pas verbalement), le visuel est indispensable. Or, parmi les courbes ci-contre, l'œil distingue immédiatement des structures plus ou moins simples et d'autres qui sont incontestablement compliquées. Nous allons les examiner dans un premier temps, puis révéler leur source.



La structure la plus simple est représentée sur le diagramme *1a* où les variations se maintiennent dans une bande «normale» très étroite, un serpent, et tout petit bout de cette chronique est presque pareil à tout autre petit bout. Tout cela correspondrait à une «volatilité», c'est-à-dire à une amplitude des fluctuations constante dans le temps.

Quant aux diagrammes les plus compliqués, certains représentent des données réelles, d'autres des simulations obtenues avec mon nouveau modèle, dit multifractal, que nous décrirons plus loin. Dans les unes et les autres, on identifie deux caractéristiques des cours des bourses : il est des jours noirs où un prix dégringole de façon instantanée ou presque, correspondant à un changement «hors toute norme», et une alternance (très irrégulière) de périodes de faible volatilité et d'autres qualifiées par les boursiers de «turbulentes».

Considérons maintenant les diagrammes simples. Dans *1b*, il y a bien des pics, plus intenses même que dans les diagrammes les plus compliqués. Mais ces pics sont isolés, et il reste un «serpent» de volatilité plus ou moins constante comme dans le diagramme *1a*. Quant au diagramme *1c*, il ne présente pas de pics, mais le fond monte et descend de façon apparemment cyclique.

En conclusion provisoire, le diagramme le plus simple et les diagrammes

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

simples se limitent nécessairement à illustrer des modèles partiels de la réalité.

MODÈLES ET RÉALITÉ

Révélons leurs sources. Le modèle *(1a)* a été proposé par Louis Bachelier en 1900 ; fondé sur l'idée que les prix suivent des «promenades aléatoires», il a conduit à ce qui allait devenir le mouvement brownien. Il s'agit là du prototype même du hasard bénin, illustré par les écarts par rapport à la moyenne caractéristique d'un tirage à pile ou face. Si ce modèle avait été réaliste, la Bourse n'aurait pas été profondément plus compliquée à étudier que les gaz en équilibre.

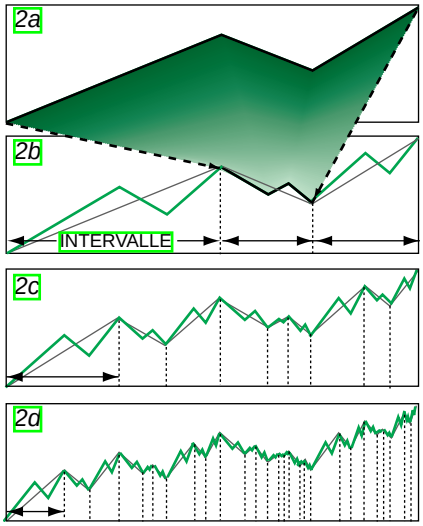
Continuons. Le diagramme *(1b)* illustre un premier modèle, que je proposai en 1963, fondé sur les processus stables (ce qui allait devenir le «vol de Lévy»). Le diagramme *(1c)* illustre un deuxième modèle, que je proposai en 1965, fondé sur le mouvement brownien fractionnaire. Chacun de ces deux modèles incorpore une des deux formes distinctes de hasard sauvage, à savoir l'«effet Noé» (événements catastrophiques isolés) et l'«effet Joseph» (alternances de vaches grasses et de vaches maigres). Utilisant ces termes, les diagrammes qualifiés de «compliqués», ont la vertu de combiner ces deux effets.

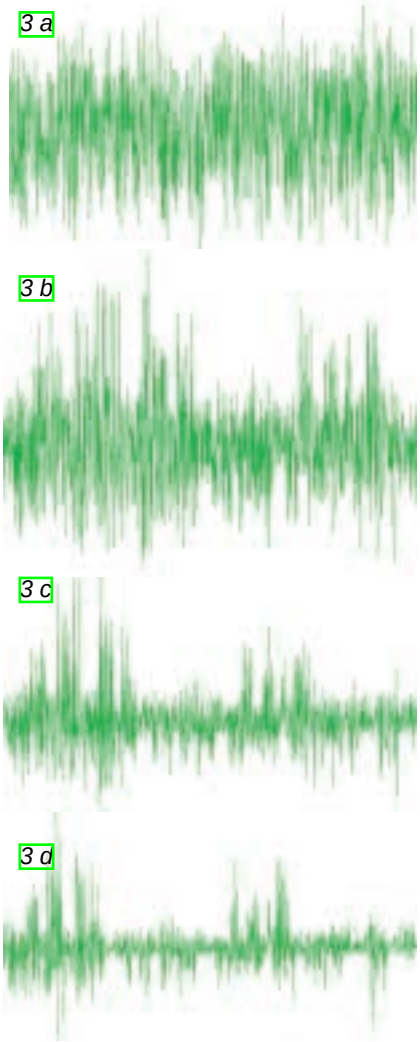
La provenance des diagrammes compliqués n'est pas évidente, même pour l'œil ! Dans ce mélange, les données réelles sont les actions IBM,*1e* et le taux de change du dollar en deutschmarks *1f* ; les simulations *1d, 1g* et *1h* concernent mon modèle actuel, qui introduit les multifractales et englobe les précédents.

Le modèle brownien, *1a*, sans qu'on l'ait cherché, et, à dessein, les modèles *1b et1c* possèdent la propriété essentielle d'être fractals, plus précisément auto-affines. Ce terme signifie que, du point de vue statistique, tout petit morceau de chronique est identique à tout grand morceau dont la taille aurait été convenablement diminuée. Or, les défaillances de ces modèles étant patentes, ils ont déjà subi des «retouches» qui sont de toutes sortes, mais ont pour caractéristique commune de détruire la fractalité.

Il est bien vrai que la fractalité se heurte presque toujours à des limitations variées, telles que des coupures internes et externes. Cependant, l'auto-affinité n'est pas une idée arbitraire ; c'est, au contraire, l'expression mathématique d'une idée très répandue, qui appartient même au folklore des marchés, à savoir que l'examen de la forme d'un zigzag boursier ne suffit pas à elle seule pour deviner si les variations représentées sont prises d'heure en heure, de jour en jour ou de minute en minute... Par conséquent, pour ne pas perdre la caractéristique fondamentale de l'auto-affinité, il est bon que les retouches n'interviennent qu'en dernière extrémité. Le modèle multifractal fait d'emblée mieux que les retouches les plus tentantes, tout en préservant une fractalité généralisée.

Le meilleur moyen de montrer la nature de cette «reprise à la base» fractale est d'en donner des «cartons», mot entendu dans le sens d'esquisse ou de caricature, un peu comme on parle de carton de tapisserie. Dans leur principe, ces cartons sont semblables au carton des côtes d'une île qu'est devenue la célèbre courbe en flocon de neige de von Koch. Avant que la géométrie fractale n'en fasse un outil de la science, ladite courbe a joué deux rôles successifs, celui de contre-exemple et celui de jeu mathématique.





Décrivons ces cartons représentés sur la figure 2 : on part d'un rectangle que traverse un «générateur», une ligne brisée continue qui constitue le graphe d'une fonction partant d'en bas à gauche, et procédant en haut à droite sans reculer dans le sens horizontal, tout en pouvant osciller dans le sens vertical *(2a)*. Puis chacun des trois intervalles du générateur est remplacé par le générateur tout entier, qui aura été resserré en accordéon pour avoir la même étendue que cet intervalle. L'interpolation se poursuit *(2b,2c,2d)* sans fin.

Les propriétés du résultat final dépendent de la forme du générateur et peuvent prendre des formes d'une étonnante variété. Par exemple, les diagrammes de la figure 3 exhibent une volatilité d'abord constante, puis de plus en plus variable.

Au-delà des cartons, je propose de représenter la variation des prix comme étant un mouvement brownien (ou brownien fractionnaire) modifié de telle façon que sa variable «temps» ne soit pas le temps d'horloge, mais en soit une fonction multifractale qualifiée de temps boursier.

Il existe déjà des résultats sur le modèle multifractal qui confirment par les mathématiques ce que l'œil nous avait appris. Mais ces résultats sont en quantité insuffisante. En attendant qu'ils se multiplient, la première tâche sera d'atteler le modèle avec la méthode de Monte Carlo pour aider à l'évaluation des risques de portefeuille. Le modèle brownien, pour lequel une belle théorie mathématique existe, est imprudent, car il prédit des risques très faibles. Le modèle *1b* prédit des risques beaucoup plus grands, mais il ne tient pas compte de la concentration des grands changements et dans beaucoup de cas exagère leurs valeurs. Le modèle du temps multifractal corrige d'emblée ces deux défauts. Son exploration ne fait que commencer et, s'il ne prétend pas dire le dernier mot, il paraît plein de promesses.

Benoit MANDELBROT est *Abraham Robinson Professor of Mathematical Sciences* à l'Université de Yale.

Deux ouvrages qu'il vient de faire paraître développent les idées de cette chronique : *Fractales, hasard et finance*, chez Flammarion, et *Fractals and Scaling in Finance : Discontinuity, Concentration, Risk*, chez Springer.

Chaud devant

AKG Photo

HERVÉ THIS

Pourquoi les aliments piquants brûlent la bouche.

Comment créer un plat parfaitement savoureux? Le cuisinier peut naturellement imaginer des variations de recettes anciennes, afin d'assembler des ingrédients dont l'association a été validée au cours de l'histoire, mais ne gagnerait-il pas à se souvenir que les molécules qu'il réunit doivent stimuler harmonieusement la gustation, l'olfaction, ainsi que les capteurs thermiques, mécaniques ou du piquant?

La mise en application de cette idée manque toutefois de bases précises. On sait que l'acidité ou l'amertume sont combattues par le sucré, ou que le salé facilite la perception des autres saveurs, par exemple, mais une compréhension moléculaire de la physiologie du goût manque encore : pourquoi le piment met-il la bouche en feu, par exemple? pourquoi les consommateurs réguliers de piments supportent-ils des doses intolérables aux novices? pourquoi aimons-nous manger des produits qui nous endolorissent? David Julius et ses collègues de l'Université de San Francisco éclairent ces questions en étudiant le récepteur de la capsaïcine, la principale molécule piquante du piment.

Une avancée importante de la physiologie humaine avait été, il y a quelques décennies, l'exploration des effets de la morphine sur le cerveau, et l'identification de récepteurs de la morphine et de ses dérivés. Si l'organisme contenait de tels récepteurs, il devait exister dans le corps des molécules analogues à la morphine. La prévision était exacte : on découvrit bientôt des opioïdes endogènes, ainsi que le système de régulation qui supprime la douleur. De même, raisonnèrent D. Julius et ses collègues, si notre espèce consomme des aliments qui contiennent des molécules piquantes, et qui activent ainsi les voies de la douleur, c'est sans doute que l'évolution a doté notre organisme de récepteurs qui sont activés par ces molécules... et surtout par des molécules endogènes qui interviennent probablement dans les mécanismes de la douleur.

Comment identifier ces récepteurs? Les biologistes ont isolé les ARN messagers présents dans les neurones qui détectent le piquant dans la bouche et construit un groupe de molécules d'ADN correspondantes ; puis ils ont introduit ces ADN dans diverses cultures de cellules pour observer les liaisons de la capsaïcine avec les protéines produites par l'ADN inséré. Ils ont finalement identifié l'ADN qui code le récepteur, nommé VR1, de la capsaïcine. L'introduction de cet ADN dans des œufs de grenouille a fourni des cultures de cellules dont la membrane contenait le récepteur.

Le piquant des piments est décrit par des unités Scoville : les piments guajillos *(à gauche)* ont un piquant de 3 000 unités Scoville, tandis que les piments de Cayenne *(au centre)* ont un piquant de l'ordre de 40 000 ; le piquant des piments habaneros *(à droite)* atteint jusqu'à 300 000 unités Scoville. Les unités Scoville sont proportionnelles à la concentration en une molécule nommée capsaïcine.

Les biologistes ont alors analysé que VR1 est un canal membranaire, c'est-à-dire une protéine qui règle le passage d'ions (surtout des ions calcium), entre l'extérieur et l'intérieur des cellules. Il est composé de quatre sous-unités, et sa liaison à la capsaïcine provoque son ouverture.

En quoi ces études aident-elles la gastronomie? Des études psychophysiologiques anciennes avaient conduit à la mise au point d'une sorte d'échelle de Richter du piquant : l'échelle du docteur Wilbur Scoville. Les enregistrements électrophysiologiques des cellules de grenouille dotées du récepteur VR1 démontrent la validité de ce classement : la réaction des cellules et, sans doute aussi, la réponse cérébrale, sont proportionnelles à la concentration en capsaïcine.

D'autre part, D. Julius et ses collègues ont montré que la capsaïcine, soluble dans les graisses, peut se lier au canal, à l'intérieur ou à l'extérieur des neurones. Son affinité pour les graisses explique pourquoi l'eau n'éteint pas les incendies de la bouche, tandis que l'absorption de pain est plus efficace.

Troisièmement l'exposition des récepteurs à la capsaïcine a donné des indications sur l'accoutumance aux mets épicés. L'ouverture du canal VR1 provoque l'afflux d'ions calcium dans les neurones, qui émettent une impulsion nerveuse quand le potentiel électrique intracellulaire atteint un seuil. Toutefois l'excès d'ions calcium intracellulaire est nocif : les œufs de grenouille dotés du récepteur VR1 meurent après quelques heures d'une exposition continue à la capsaïcine, sans doute parce que l'afflux d'ions calcium est excessif.

La perte de sensibilité des amateurs d'épices, qui semble résulter de la mort des fibres sensorielles, expliquerait l'effet paradoxal de la capsaïcine dans le traitement des névropathies virales ou diabétiques, ainsi que dans la polyarthrite rhumatoïde : tuant les neurones de la douleur, la capsaïcine provoquerait une analgésie.

Enfin les biologistes ont mesuré que des augmentations rapides de températures provoquent, dans le récepteur VR1, des courants d'ions analogues aux courants provoqués par la capsaïcine : le canal VR1 est un capteur simultanément chimique et thermique... et voilà pourquoi la consommation des plats pimentés met la bouche en feu.

Prochain rendez-vous *France Info* et *Pour la Science* le 31 décembre 1997, avec la chronique *Info Sciences* de Marie-Odile Monchicourt.

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

JEU-CONCOURS N° 42

PIERRE TOUGNE

Jeu d'allumettes

Nombreux sont les jeux qui se jouent avec des allumettes. Le plus connu est certainement le «Jeu de Marienbad» qu'Alain Resnais montre dans son film *L'année dernière à Marienbad*. Son analyse, un classique des jeux mathématiques, n'est pas des plus faciles. Ce mois-ci, je vous propose d'étudier un jeu du même type. On forme un tas d'un nombre impair d'allumettes et deux joueurs, à tour de rôle, en extraie une ou deux allumettes, jusqu'à épuisement du tas. Le gagnant est celui qui a retiré un nombre impair d'allumettes. La règle garantit l'existence d'un gagnant, car la somme des allumettes retirées par chaque joueur étant un nombre impair, un des deux joueurs en aura retiré nécessairement un nombre impair tandis que l'autre en aura retiré un nombre pair. Pour un tas de 19 allumettes, qui, du premier ou du second joueur, en admettant que les deux joueurs jouent parfaitement, gagnera la partie et avec quelle stratégie ? Plus généralement, selon le nombre impair *N* d'allumettes du tas initial, quel sera le joueur gagnant, celui qui commence ou l'autre ?

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de décembre 1997, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 40

N'ayant pas précisé la forme des réponses aux questions, les lecteurs se sont partagés en deux groupes selon le type de réponse qu'ils considéraient comme autorisée. Dans le premier groupe, qui ne considère que les réponses oui ou non (ou éventuellement une direction), le nombre de questions à poser est au maximum de quatre selon le principe suivant : on pose aux trois autochtones une même question, dont la réponse est évidente, comme par exemple : «est-ce que 2 + 2 = 4?». Sur les trois réponses, on en aura toujours deux identiques, car le menteur répondra non, celui qui dit la vérité oui et le fantasque oui ou non selon son humeur. Ainsi l'autochtone qui donne une réponse différente des deux autres sera soit le menteur, soit celui qui dit la vérité. Maintenant on demande à cet autochtone : «Quelle est la route de Paris ?». S'il a répondu précédemment oui, on suit son indication, s'il a répondu non, on prend l'autre route.

Remarquez que si l'on a la chance d'avoir la même réponse à la première question pour les deux premiers autochtones, il n'est pas besoin de la poser au troisième, car on connaît la réponse et l'on passe directement à la deuxième question, donc au total trois questions. Pour le deuxième groupe, on admet en plus des réponses du premier groupe, l'absence de réponse pour le menteur ou celui qui dit la vérité à une question à laquelle il ne sait pas répondre tandis que le fantasque répondra toujours. Dans ce cas, il faut trois questions maximum selon le schéma suivant : on désigne par *A*, *B* et *C* les trois autochtones et l'on pose les deux questions suivantes à *A* ; «Si je demande à *B* la route de Paris, quelle sera sa réponse ?». «Si je demande à *C* la route de Paris, quelle sera sa réponse ?» S'il n'y a qu'une seule réponse, *A* est soit le menteur, soit celui qui dit la vérité et la route de Paris sera le contraire de celle indiquée. Enfin, si l'on a deux réponses, c'est parce que *A* est le fantasque et on pose à *B* la question : «Si je demande à *C* la route de Paris, quelle sera sa réponse ?» et la route de Paris sera l'opposée de celle indiquée. Remarquez que dans deux cas sur trois, on connaîtra la bonne route en seulement deux questions.

Enfin, je ne résiste pas à vous indiquer la solution humoristique sans question d'un fidèle lecteur de la rubrique : [J'annonce aux autochtones une nouvelle du genre «*il n'y a pas une seule goutte de vin à Rome, mais il coule à flots à Paris*»] et il me suffira de prendre la même route que celle qu'ils emprunteront tous les trois !

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

Yann Foley

L'innovation et le paradigme industriel

ALAIN ETCHEGOYEN

La création d'emplois passe aussi par l'innovation appliquée au secteur des services.

Dès qu'il s'agit de développer ou favoriser l'innovation, les acteurs économiques français raisonnent, depuis 25 ans, selon un paradigme industriel. L'innovation serait toujours l'aboutissement d'un courant qui prendrait sa source dans la recherche fondamentale, s'écoulerait dans le développement, pour déboucher sur des brevets et des innovations industrielles. D'où l'étude toujours renouvelée de l'efficacité de chaque maillon de la filière innovation : comptabilité des brevets, calcul des innovations issues des formations universitaires, comparaison des performances des grandes écoles

Sans doute, faut-il perfectionner cette filière de production d'innovations en améliorant chaque maillon, l'*X*, Centrale, les grandes universités et les grands groupes industriels... Mais cette manière exclusive de raisonner nuit à l'avènement d'innovations économiquement importantes.

Au début des années 1980, Michel Crozier avait déjà souligné que les possibilités du secteur service étaient inversement proportionnelles à la considération dont il jouissait dans les milieux économiques et politiques. Parallèlement d'autres voix avaient critiqué l'identification par Jacques Attali des professions de service aux «coiffeurs» où il ne pouvait y avoir de gains de productivité. Les temps et les hommes ont changé, mais le modèle industriel reste présent.

Or des entreprises françaises très performantes comme les grands groupes de distribution, comme *Sodexho*, *Decaux* ou *Nouvelles Frontières* s'intègrent mal à nos représentations classiques des processus d'innovation. D'ailleurs, ceux qui les dirigent, les ont créées ou développées, ne sont issus ni des grandes écoles d'ingénieurs ni des universités les plus reconnues en matière de recherche. Dans la philosophie spontanée des scientifiques et des industriels, le secteur des services échapperait à toute maîtrise en amont de ses opérations et il s'y trouverait moins de matière grise.

Il est dangereux de raisonner ainsi : la différence principale entre l'industrie et les services porte sur la manière de considérer l'innovation. Dans l'industrie, la relation entre la production et le client est médiate et indirecte, tandis que dans les services elle est immédiate et directe. Autrement dit, les processus d'innovation sont pilotés différemment : la recherche en amont du service ne jouit pas de l'autonomie dont elle dispose dans l'industrie. On y recense moins de tâtonnements, moins d'essais et erreurs, moins de chantiers avortés, car la sanction est beaucoup plus rapide.

Il est désormais décisif que le client «innovation» de la recherche scientifique perde son identité industrielle pour s'élargir à l'ensemble des secteurs. N'est-il pas regrettable, par exemple, qu'un grand groupe de distribution français soit contraint de rechercher outre-Atlantique les opérateurs susceptibles de l'aider pour développer des systèmes d'information ou d'automatisation ? Les filières de la recherche appliquée française refusent, par manque de souplesse, qu'une entreprise de distribution ait son mot à dire en matière d'innovation. Or les entreprises de services ont plus que jamais besoin de machines, de logiciels, de processus spécifiques qui incorporent une grande quantité de matière grise.

La caractéristique principale de l'innovation dans les services découle directement de la relation prestataire/client. Ce qui constitue l'essence même de l'activité de service – la relation du coiffeur et du coiffé, du restaurateur et du restauré, du voyagistes et du touriste – permet de distinguer l'innovation dans le *back office* de l'innovation dans le front office, l'innovation invisible et l'innovation visible. La première n'est pas très différente de l'innovation industrielle : en matière de gestion, d'organisation, de systèmes d'information, de nombreuses innovations sont communes. Mais les relations entre le front office et le *back office* sont beaucoup plus directes et cruciales. Quand le système *Socrate (back office)* connaît des ratés, c'est tout le *front office* qui en est affecté et le client de la SNCF proteste. L'industrie n'a pas cette rapidité de réaction imposée par le client. Mais c'est pour cette même raison que l'innovation est la clef du secteur des services.

Si l'on veut donc réfléchir sur les conditions de l'innovation dans l'économie, tous les éléments de la recherche et de la technologie devraient s'ouvrir à des partenaires qui ne leur sont pas naturels. L'ANVAR avait décidé d'élargir ses compétences au secteur des services, mais le modèle industriel est resté prégnant. Bien que chacun sache le rôle croissant des services pour l'emploi dans une économie moderne, l'innovation technologique ne se met pas encore au service de ses clients potentiels comme s'il fallait une sorte de révolution culturelle.

L'exemple des recherches actuellement menées dans le multimédia est particulièrement intéressant. La réussite des innovations dépend à la fois d'une technologie de pointe, de contenus appropriés et d'un bon placement sur le marché. Quand on ne tient pas ces trois éléments, tout projet est voué à l'échec. La perfection n'est pas de mise si elle déséquilibre ce triumvirat : si la volonté de perfection retarde l'introduction d'un nouveau produit sur le marché, un autre, plus bricolé, moins parfait, prendra le dessus en imposant ses normes.

L'innovation dans les services enseigne, plus que toute autre, l'impératif du client et l'importance du marché. Une relation plus étroite entre la recherche et le secteur des services serait efficace économiquement, mais aussi pédagogiquement : elle permettrait d'ancrer toujours plus le souci du client dans un pays où, malgré tous les efforts accomplis, la mesure de la qualité reste souvent plus la perfection dans la réalisation d'un cahier des charges que la satisfaction des clients sur un marché.

Alain ETCHEGOYEN est professeur de philosophie et conseiller d'entreprises.

La malédiction du tyrannosaure :

suite et fin?

Après avoir défrayé la chronique judiciaire plus que suscité des études paléontologiques, le tyrannosaure *Sue*, trouvé dans le Dakota du Sud en 1990, extrait par les chercheurs «commerciaux» du *Black Hills Institute*, puis saisi par le FBI, a enfin trouvé un gîte définitif. À l'issue de brèves enchères à New York, le squelette a été acquis par le *Field Museum* de Chicago, pour la somme de 8,4 millions de dollars (soit environ 50 millions de francs avec la commission de Sotheby). Voilà qui doit satisfaire Maurice Williams, le propriétaire du terrain où fut trouvé le fossile, qui empochera la plus grande partie du butin, et faire grincer quelques dents, notamment celles de Peter Larson, du *Black Hills Institute*, qui avait réalisé les fouilles, et qui a passé quelques mois en prison à la suite de ses démêlés avec la justice américaine suite au procès sur la propriété du dinosaure.

Si prestigieuse fut-elle, une institution comme le *Field Museum* n'aurait pas eu les moyens de s'offrir *Sue* à un tel prix. Les universités de l'État de Californie ont donné un coup de main, mais ce sont deux généreux mécènes qui ont permis au musée de Chicago de l'emporter, à savoir les Sociétés *McDonald* et *Walt Disney*. En échange de leur aide, les mécènes en question utiliseront des moulages du squelette à des fins publicitaires, ce qui n'est que justice.

Jeff Christensen Gamma Liaison

Résultat de la vente aux enchères de *Sue*, le *Tyrannosaurus rex*.

Les paléontologues professionnels se réjouiront sans doute de savoir que ce squelette de *Tyrannosaurus rex* trouvera sa place dans une collection publique, où il sera à la fois disponible pour étude scientifique et visible par le public. Il est aussi plutôt satisfaisant de voir des entreprises privées s'intéresser de la sorte à la paléontologie (même si la «tyrannomanie» ambiante et le caractère spectaculaire du fossile ne sont pas étrangers à cet intérêt). Beaucoup de grandes collections paléontologiques de par le monde doivent certains de leurs trésors à des mécènes privés (un des premiers exemples étant celui de Werner von Siemens, qui, en 1877, permit au Musée de Berlin d'acquérir le deuxième squelette d'*Archaeopteryx*). L'exemple de la vente de *Sue* suscitera-t-il un regain de ce type de mécénat scientifique? On ne peut que l'espérer. Mais ce que l'on peut déplorer, c'est le prix incroyable qu'il a fallu payer pour acquérir ce tyrannosaure. On peut se demander s'il est vraiment raisonnable de dépenser pour se procurer un seul spécimen, si beau soit-il, d'un dinosaure déjà relativement bien connu, une somme qui aurait permis de financer des centaines d'expéditions paléontologiques susceptibles de collecter des milliers de fossiles, et d'apporter quantités de données nouvelles. Pour donner un terme de comparaison, la *Dinosaur Society*, une des principales fondations finançant la recherche sur les dinosaures, a dépensé depuis 1993, pour soutenir des dizaines de projets dans le monde entier, la somme de 980 000 dollars.

Y a-t-il une morale à l'histoire mouvementée de *Sue* le tyrannosaure? S'il y en a une, elle est pour le moins obscure. N'est-il pas étonnant que des musées aient surenchérit les uns sur les autres?

Eric BUFFETAUT

La mémoire saisie au vol

Quelle quantité d'informations captons-nous en un coup d'œil?

Quand nous scrutons une scène ou lisons un texte, le regard se pose sur un détail pendant une fraction de seconde, puis saute et se pose ailleurs, et les informations captées au cours des fixations successives sont assemblées en un tout cohérent. Quelle quantité d'informations est-elle saisie à chaque étape? Le jeu des sept erreurs montre que cette information est limitée. Dans ce jeu, deux dessins identiques, à sept différences près, sont placés côte à côte. Quand nous regardons les dessins attentivement, à tour de rôle, ils nous paraissent d'abord identiques, puis les différences se manifestent, une à une, et deviennent alors évidentes. Quand nous fixons une portion d'image où se trouve une différence et que nous ne voyons pas celle-ci, c'est que nous n'avions pas mémorisé de manière suffisamment détaillée la portion correspondante sur l'autre image. D'où l'idée d'évaluer, à travers ce jeu, la capacité de la mémoire visuelle à court terme.

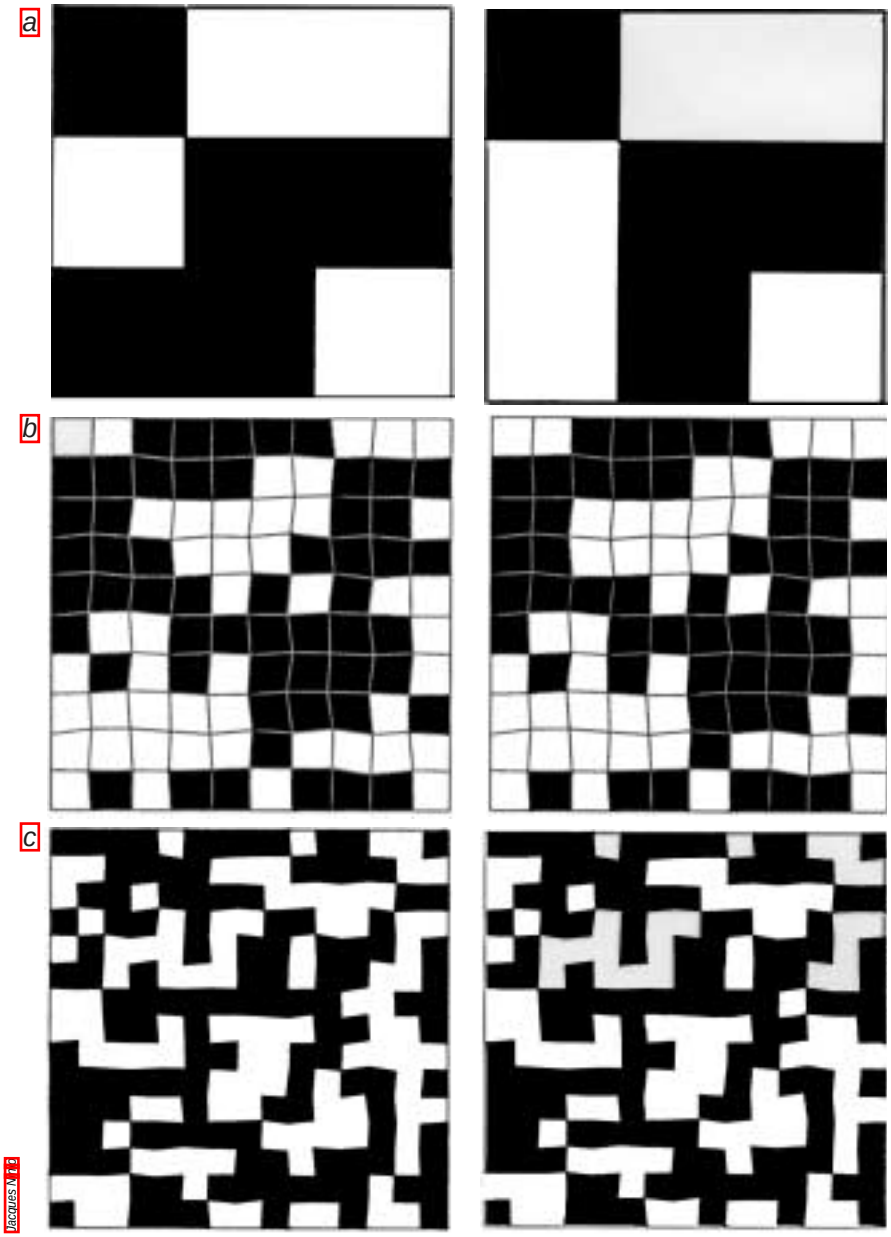
Pour faire des mesures, nous utilisons des images à trame carrée, en damier, dont les cases sont noires ou blanches par tirage au sort. Les trames sont déformées de manière contrôlée, ce qui rend les images moins austères. Nous affichons, côte à côte, sur un écran d'ordinateur, des paires d'images qui ne diffèrent que par une seule case, qui, de noire dans une image, est devenue blanche dans l'autre.

Le temps mis par les sujets pour localiser la différence est, en moyenne, égal au nombre de cases dans l'image, multiplié par 50 millisecondes, soit en moyenne 0,45 seconde pour traiter un couple d'images 3×3 telles que *(a)*, et 11,2 secondes pour des images 15×15 telles que *(c)*. Le temps est le même, que le damier soit parfaitement carré, comme en *(a)* ou déformé comme en *(b)* et en *(c)*. La présence d'une trame qui discrétise l'image et sépare les éléments, comme en *(b)*, ne facilite pas le travail : dans ce cas, il faut 15 millisecondes de plus par case pour trouver la différence. Le cerveau

humain préfère donc travailler sur des formes continues. Les changements les plus facilement détectés sont ceux de nature topologique, quand, par exemple, un filet noir d'un seul tenant dans une image se retrouve scindé en deux dans l'autre, ou quand un bloc compact noir dans une image se retrouve incrusté d'un carré blanc dans l'autre.

Les 50 millisecondes par case mesurées pour les images complexes, de type *(c)*, comprennent le temps pour capter et interpréter les informations des images gauche et droite, ainsi que le temps pour déplacer le regard d'une image à l'autre. Le temps de comparaison lui-même devrait être bien inférieur, peut-être de l'ordre de 10 ou 20 millisecondes par case.

Quelle est la quantité d'informations captée à chaque fixation du regard? Pour le savoir, changeons de protocole : cette fois, nous présentons des couples d'images qui sont, soit identiques, soit différentes, et le sujet doit apprécier si les images sont les mêmes ou non. Avec des couples d'images très élémentaires (par exemple, un simple carré blanc *versus* un simple carré blanc ou noir), une image est captée en une fois, et la comparaison avec l'autre image conduit également vite à la réponse, qu'elle soit «oui» ou «non». Avec des images très complexes, le sujet met en moyenne moins de temps pour répondre «non» que pour répondre «oui» : quand les images sont différentes, la réponse «non» est acquise dès que la différence est localisée, et l'exploration s'arrête. Dans le cas contraire, le sujet doit explorer plus à fond pour se convaincre qu'elles sont identiques. Une inégalité entre les temps de réponse «oui» et «non» commence à se manifester avec



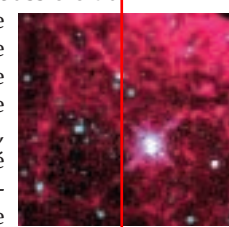
Jacques Nico

Trois paires de grilles utilisées pour mesurer la quantité d'informations captées par le regard.

BRÈVES

Un sacré pistolet

L'étoile du pistolet, ainsi nommée en raison de la forme de la nébuleuse qui l'abrite, a étonné les astronomes par sa taille. Cachée dans la poussière du centre de notre Galaxie, elle est 100 fois plus grosse que le Soleil et dix millions de fois plus lumineuse. À l'aide du Télescope spatial *Hubble*, les astronomes ont détecté cette géante au mois d'octobre 1997. Comme la durée de vie d'une étoile varie en raison inverse de sa masse, cette «cigale énergétique» ne vivra que 100 000 ans.



HST

Les risques de la pauvreté

Les enfants des familles pauvres écossaises risquent plus (deux à dix fois) d'être victimes d'un grave accident de la circulation que les adolescents issus de familles aisées. Cette aggravation du risque résulte d'une présence accrue des enfants pauvres dans les rues. Résultat prévisible d'une cause connue, l'ampleur de l'augmentation étonne toutefois.

Du collagène, pas du bitume

Il y a 8 200 ans, des hommes ont laissé dans la grotte de Nahal Hemar, en Israël, un ensemble d'objets parmi lesquels des paniers et des crânes décorés qui étaient enduits d'une substance noire et collante. Selon Arie Nissenbaum, de l'Institut Weizmann, cette substance, que l'on pensait être du bitume à cause de la proximité de gisements, est en fait du collagène. Les hommes du Néolithique ancien savaient donc déjà extraire cette protéine fibreuse, la plus abondante dans les organismes animaux, et l'utilisaient comme adhésif. Le collagène était probablement extrait de peaux.

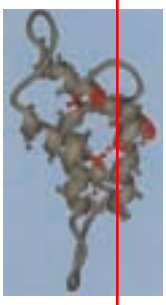
Fort de café

Pourquoi une goutte de café laisse-t-elle en séchant une trace au contour sombre? L'évaporation en un point de la goutte est d'autant plus rapide que l'épaisseur est faible. La goutte conservant à peu près le même contour pendant l'évaporation, le liquide s'évapore vite près du bord : le profil de surface n'est maintenu que grâce à un flux de liquide du centre vers le bord. Les particules en suspension, qui se déposent lorsque l'eau s'évapore, s'accumulent donc sur le contour.

Suite page 26

BREVES *Suite de la page 25*

Détection des prions anormaux


Fred Cohen

Jusqu'à présent, on ne pouvait établir avec certitude le diagnostic de la maladie de Creutzfeldt-Jakob qu'en observant le cerveau des patients décédés. Une équipe de la Société suisse *Prionics* a mis au point un anticorps qui reconnaît spécifiquement le prion anormal qui semble être la cause de la maladie. Ce test, validé sur des cerveaux, sera peut-être suffisamment sensible pour que le prion anormal soit détecté dans les amygdales ou dans les ganglions des personnes atteintes. Si cet anticorps réussit à inactiver le prion anormal, il deviendrait un agent thérapeutique.

Pomme de terre et peinture

Les végétaux synthétisent des molécules complexes, qu'il serait intelligent d'extraire et de transformer, au lieu de synthétiser difficilement des composés organiques à partir de pétrole. Cette idée est aujourd'hui passée dans l'industrie des peintures : des chimistes de la Société *ICI* ont proposé de remplacer des composés acryliques ou vinyliques par de l'amidon purifié à partir de maïs, de blé ou de pommes de terre. Les peintures à l'amidon durcissent comme les peintures classiques et ne pourrissent pas sur les murs : l'amidon est au sein du dépôt, protégé des micro-organismes qui le consommeraient.

L'hygiène sur Mir

Maladies de peau, infections respiratoires, contamination des aliments : l'hygiène sur la station orbitale Mir est médiocre. Selon les études d'un microbiologiste italien, les astronautes qui vivent dans l'atmosphère confinée de Mir libèrent 15 fois plus de micro-organismes par minute que dans des conditions normales. Dans l'espace, le système immunitaire est affaibli, de sorte qu'à la fin d'un vol de longue durée les risques d'infection sont accrus.

Satellites irréguliers

Deux nouveaux satellites d'Uranus ont été observés avec le télescope du Mont Palomar, en Californie. De 80 à 150 kilomètres de diamètre, ces deux agglomérats de glace et de poussières tournent sur des orbites «irrégulières», excentriques et inclinées par rapport au plan de l'écliptique à six et huit millions de kilomètres de la planète. Cette découverte porte à 17 le nombre de satellites d'Uranus.

Suite page 28

des images 3×3 pour certains sujets, et des images 4×4 pour d'autres, d'où la conclusion que la quantité moyenne d'informations saisies en une fixation du regard est intermédiaire entre 9 et 16 éléments binaires, soit environ 12 bits, plus ou moins 3 bits. Avec des couples d'images 4×4 présentant une seule différence, de nombreux sujets font des erreurs, et les jugent identiques, ce qui montre, d'une autre manière, que la région saisie avec précision est inférieure à 4×4.

Ce résultat sur la «mémoire en vol» cadre bien avec ce que l'on sait de la lecture : le regard se pose sur un mot, capte exactement un petit nombre de lettres significatives, et les autres lettres sont moins lues que devinées en fonction du contexte, d'où la difficulté pour repérer certaines erreurs typographiques. Il cadre aussi avec des expériences plus anciennes faites dans les années 1960 par George Sperling, à l'Université Harvard : Sperling avait présenté brièvement à des sujets des tableaux de 12 lettres et observé qu'ils en retenaient environ quatre ou cinq seulement à leur emplacement exact.

Utilisant nos images de synthèse, nous avons entrepris de caractériser l'acquisition d'informations en mémoire sur de plus longues durées. Un sujet observe une image isolée pendant un temps déterminé, puis un couple tel que *(c)* qui contient d'une part cette image (soit à gauche, soit à droite), d'autre part une image qui en diffère en un nombre q de cases, et il doit dire si l'image vue en premier est celle de gauche ou de droite. Quand q est petit – par exemple, égal à un –, le sujet risque de répondre au hasard, parce qu'il ne se souvient pas de l'image initiale de manière suffisamment détaillée. En choisissant q convenablement, on arrive à cerner, pour chaque sujet, la quantité d'informations acquises.

Typiquement, quand un sujet voit une image 8×8 pendant une seconde, il la reconnaît une fois sur deux au sein d'un couple présentant trois différences, et répond au hasard les autres fois, d'où l'on calcule qu'il mémorise environ 13 bits par image. Quand il examine l'image pendant huit secondes, il mémorise un peu plus : en moyenne 20 bits. On aurait pu s'attendre à trouver des valeurs bien supérieures, sachant que les 12 bits de la mémoire en vol sont acquis en 200 ou 300 millisecondes. Les prises d'information visuelle ne s'additionnent donc pas de manière simple, du moins avec nos images de synthèse. Selon toute vraisemblance, la mise en mémoire réclame une appréhension analytique allant au-delà de la première impression. Notre vocabulaire des formes, pour décrire les motifs abstraits, est sans doute insuffisant. Le problème est différent, dans la lecture ou lors du déchiffrement d'une partition musicale, car, grâce à des années d'apprentissage intense, nous convertissons très efficacement les symboles visuels en entités ayant un sens, facilement mémorisables.

L'interprétation d'une image ayant une portée écologique est particulièrement rapide : Simon Thorpe et ses collègues du Centre de recherche cerveau et cognition à Toulouse ont montré qu'en 140 millisecondes, le cerveau humain sait si une image représente ou non un animal, et nous verrions bien plus d'une scène naturelle soudain révélée par un éclair lumineux que nos 12 bits de base. Ici aussi, il apparaît que l'information qui se grave n'est pas exprimée par une séquence de pixels, comme le serait une image vidéo, mais plutôt par la présence ou l'absence de certains éléments significatifs : visage, animal, plante, maison, plan d'eau, masse rocheuse... Une représentation qui s'exprimerait comme une combinaison de matériaux déjà en mémoire pourrait être compacte, et néanmoins riche, dans la mesure où chacun des éléments pris en compte serait lui-même complexe.

Jacques NINIO et Nicolas BRUNEL
École normale supérieure, Paris

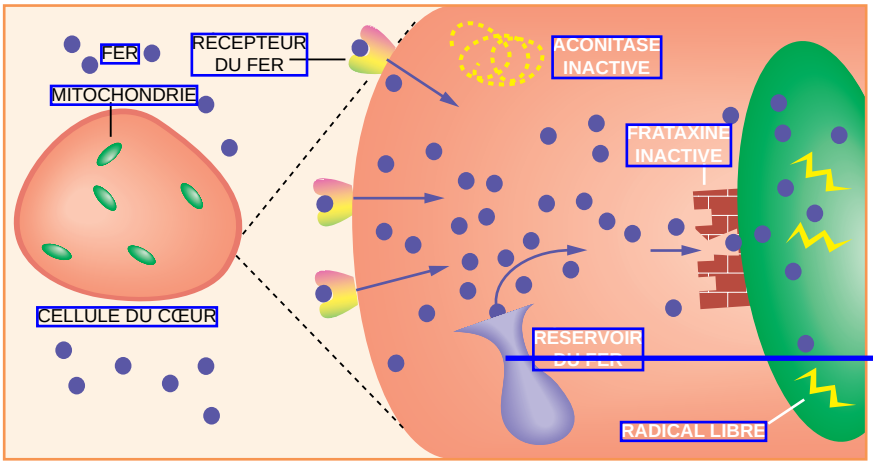
L'ataxie de Friedreich

Cette maladie génétique résulte d'une accumulation de fer dans les «centrales énergétiques» des cellules.

L'ataxie de Friedreich est une maladie neurodégénérative qui touche environ une personne sur 50 000. En 1996, le gène responsable de la maladie a été isolé ; il code une petite protéine, la frataxine, dont la fonction était encore inconnue. Agnès Rötig et ses collègues de l'Unité INSERM 393, à l'Hôpital Necker-Enfants Malades, viennent de montrer que l'absence (ou une quantité insuffisante) de cette protéine chez les malades perturbe la production de l'énergie des cellules.

La maladie se manifeste par une mauvaise coordination des mouvements, des troubles moteurs et une faiblesse musculaire ; les malades ont souvent un cœur anormalement gros. Avant même d'en avoir la preuve, on pensait que l'ataxie de Friedreich était une maladie mitochondriale, ce type de maladies qui résultent d'une anomalie des mitochondries, les «centrales énergétiques» des cellules

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997



Chez les personnes atteintes de la maladie de Friedreich, les deux remparts qui protègent les cellules et ses constituants contre un excès de fer sont inactifs : l'aconitase n'empêche pas la fabrication des récepteurs membranaires du fer et les «réservoirs» du fer ne stockent pas l'élément, de sorte que le fer s'accumule dans le cytoplasme ; le second rempart inopérant, la frataxine, laisse pénétrer le fer dans les mitochondries qui subissent l'attaque destructrice des radicaux libres créés par le fer.

qui, grâce à la chaîne respiratoire, produisent l'énergie dont l'organisme a besoin pour fonctionner. Chaque cellule contient des centaines de mitochondries, et leur répartition entre ses cellules filles est aléatoire (à chaque division cellulaire, le stock de mitochondries double, de sorte que chaque cellule fille hérite d'un nombre constant de mitochondries). Quand un ovule fécondé contient quelques mitochondries dont l'ADN est muté, certaines cellules filles héritent de nombreuses mitochondries mutées, tandis que d'autres reçoivent surtout des mitochondries normales. La nature et la gravité des symptômes varient d'une personne à l'autre selon la localisation et la quantité des mitochondries anormales. Quand la production d'énergie par les mitochondries est insuffisante, certains organes, tels le cœur, le cerveau ou les muscles ne fonctionnent plus correctement et la maladie s'installe.

L'équipe de Necker-Enfants Malades a étudié un enfant qui présentait une hypertrophie du cœur et une maladie de Friedreich. Or cet enfant avait aussi une anomalie mitochondriale très rare, touchant simultanément plusieurs protéines de la chaîne respiratoire mitochondriale, et aussi l'aconitase, une enzyme du cytoplasme qui sert à la régulation de la concentration en fer des cellules. Le déficit des enzymes normalement produites par les mitochondries ne fut décelé que dans le cœur.

Simultanément, des études sur la levure montraient qu'en l'absence de l'homologue de la frataxine, les levures ont une production d'énergie anormale et que tout le fer s'accumule dans les mitochondries. Ainsi, la frataxine contrôle l'apport du fer dans les mitochondries, puisqu'en son absence, le fer s'y accumule. Les divers résultats ont montré que l'ataxie de Friedreich est une maladie mitochondriale résultant d'une anomalie de la concentration en fer dans les mitochondries.

La perte de l'activité de l'aconitase amplifie l'anomalie, car c'est une enzyme essentielle pour l'introduction du fer dans les cellules et pour son stockage. Normalement, en présence d'un excès de fer, les cellules fabriquent des sortes de réservoirs (des molécules de ferritine) et peu de récepteurs du fer : l'élément ne pénètre pas dans les cellules et sa concentration à l'état libre est limitée. Au contraire, en cas de carence en fer, la fonction de l'enzyme aconitase change : elle perd ses propres atomes de fer, inhibe la fabrication des réservoirs de fer et favorise la production des récepteurs membranaires du fer (davantage de fer entre dans les cellules). L'aconitase sert de premier rempart de régulation de l'entrée du fer dans les cellules. Quand l'aconitase n'est pas fonctionnelle, comme c'est le cas chez les personnes atteintes de la maladie de Friedreich, le fer abonde dans les cellules. Normalement, la frataxine devrait servir de second rempart, en empêchant que le fer ne traverse la membrane mitochondriale. Lorsqu'elle n'est pas fonctionnelle, le fer s'accumule dans les mitochondries. Or, cet élément est un agent oxydant qui engendre la production de radicaux libres toxiques pour la chaîne respiratoire mitochondriale, donc pour la production de l'énergie cellulaire.

Il reste à comprendre comment la frataxine régule l'entrée du fer dans les mitochondries, et pourquoi le cerveau et le cœur sont parmi les organes les plus atteints. Maintenant que l'on connaît la cause cellulaire de la maladie de Friedreich, on pourra peut-être réduire les effets dévastateurs de l'anomalie en luttant contre l'accumulation du fer dans les mitochondries ou contre les conséquences du stress oxydatif qui en résulte.

Le colza et la ravenelle

Le colza transgénique transfère un gène de résistance à sa cousine, la ravenelle.

Déjà produits outre-Atlantique, les végétaux transgéniques, contenant un gène dont ils sont normalement dépourvus, ne sont cultivés qu'à titre expérimental en Europe. Toute variété nouvelle est accueillie avec circonspection : c'est le cas d'un colza génétiquement modifié pour résister à un herbicide. Lors de l'épandage de cet herbicide, les mauvaises herbes seraient éliminées et, seul, le colza serait préservé... à condition que le gène de résistance ne soit pas transmis aux autres plantes. Or, l'équipe d'Anne-Marie Chèvre, à l'INRA de Rennes, vient de montrer que le colza se croise avec sa cousine la ravenelle, et lui transmet, notamment, son gène de résistance à un herbicide.

Depuis une cinquantaine d'années, le colza est cultivé en France (quelque 750 000 hectares) surtout pour ses graines oléagineuses. En serre, des croisements forcés, où la pollinisation est faite à la main, donnent des hybrides entre le colza et des espèces proches, tels le chou, la moutarde noire ou encore la ravenelle, une mauvaise herbe qui pousse naturellement à proximité du colza et fleurit au même moment. Que se passe-t-il en plein champ, quand la pollinisation n'est pas forcée par l'homme ?

Le pollen (les gamètes mâles) est alors véhiculé par les insectes ou par le vent vers les pistils (portant les gamètes femelles). Pour reproduire des conditions naturelles, les agronomes de l'INRA ont planté côte à côte des quantités équivalentes de colza et de ravenelle. Pour le colza, ils ont choisi une variété sans pollen, de sorte que la fécondation se faisait seulement par l'intermédiaire du pollen de ravenelle. Ce choix leur permettait

BREVES *Suite de la page 26*

Refroidissement terrestre

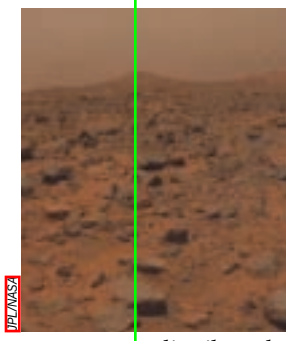
En étudiant des sédiments prélevés au large de la Grande-Bretagne, des géologues de l'Observatoire Lamont-Doherty ont trouvé, régulièrement espacées, des couches de particules rocheuses microscopiques provenant du Groenland et du verre issu des volcans d'Islande : tous les 1 500 ans environ, les eaux charriant des icebergs descendent vers le Sud, jusqu'en Grande-Bretagne. Les eaux polaires pénètrent alors dans l'océan Atlantique Nord chaud, modifiant la circulation globale des océans. Les températures restent basses pendant quelques siècles et remontent aussi vite qu'elles étaient descendues.

Export nucléaire

Les protéines sont synthétisées dans le cytoplasme, mais quelques-unes sont requises dans le noyau des cellules, par exemple pour l'activation de certains gènes. On connaissait des récepteurs qui assurent l'entrée des protéines dans le noyau, mais on ne savait pas comment elles en sortent. Trois équipes dont celle de Catherine Dargemont, à l'Institut Curie, ont trouvé la «navette» qui assure le transport des protéines dans le noyau et leur sortie par l'intermédiaire de pores nucléaires. Après avoir relargué dans le cytoplasme la protéine véhiculée, la navette est recyclée, mais une question se pose : qui assure le transport de la navette elle-même dans le noyau?

Tectonique martienne

Les planétologues ayant analysé les résultats de la sonde Mars *Pathfinder* ont trouvé tant de ressemblances entre les roches martiennes et les roches terrestres qu'ils supposent qu'un processus tectonique a aussi façonné la planète. La sonde a trouvé de la silice, laquelle est, sur la Terre, produite par le recyclage des roches dans le manteau; on pensait que la planète, plus petite que la Terre, s'était refroidie si vite que la tectonique n'aurait pas eu le temps de redistribuer les matériaux à l'intérieur de la planète : il n'en est rien. Ajoutée à la découverte de traces d'eau, les planétologues ont conclu que le climat de Mars avait été bien plus chaud et plus humide qu'on ne le croyait.



JPL/NASA

d'optimiser la pollinisation par la mauvaise herbe.

Pour suivre plus aisément les transferts de gènes, les agronomes ont introduit dans le génome du colza le gène *bar*, conférant une résistance à un herbicide total, le *Basta*. L'enzyme codée par ce gène est naturellement synthétisée par un micro-organisme du sol qui dégrade cet herbicide. En introduisant ce gène dans le génome des plantes, on les rend résistantes (grâce à l'enzyme de dégradation qu'elles produisent alors «naturellement», les plantes restent insensibles à l'herbicide).

Vacana/Rugoli Kot

Le colza transgénique ne sera sans doute pas parmi les premières plantes génétiquement modifiées à être cultivées.

Dans l'expérience, les plants de colza pollinisés par des ravenelles ont donné des graines hybrides. Ces graines ont été replantées près de ravenelles, et ainsi de suite à plusieurs reprises. Pour sélectionner les graines qui contenaient une partie du génome du colza (dont le gène *bar*), les biologistes épandaient un peu de *Basta* détruisant les plantules sensibles. Progressivement, on obtient des plantes qui ont l'aspect de la ravenelle, mais qui expriment aussi des gènes du colza, notamment le gène *bar* : ce gène est encore exprimé à la quatrième génération dans près d'un quart des hybrides. Ainsi, des gènes sont transmis spontanément entre des plants de colza et de ravenelle poussant à proximité, et ils restent présents pendant plusieurs générations.

Dès lors, peut-on cultiver sans risque des plantes transgéniques contenant un gène de résistance à un herbicide? Pour Louis-Marie Houdebine, de l'INRA de Jouy-en-Josas, «la mise en culture d'un colza résistant ne respecte pas le principe élémentaire de précaution. La diffusion du transgène est inévitable, et cet enjeu économique, qui n'est pas essentiel, ne vaut pas de courir le risque de donner à une mauvaise herbe un avantage sélectif, peut-être incontrôlable à longue échéance.» Selon Francine Casse, de l'Université de Montpellier II, le risque nul n'existe pas, mais parce que l'on pourrait utiliser des herbicides plus spécifiques, et réduire les quantités épandues, certaines plantes résistant à un herbicide, choisies avec discernement, représenteraient un progrès pour l'environnement.

Pour Jean-Pierre Prunier, à la Direction scientifique des productions végétales de l'INRA, le gène de résistance à cet herbicide sera transmis à d'autres plantes sauvages, mais les conséquences ne seront pas insurmontables puisqu'il suffira d'utiliser un herbicide différent pour détruire les plantes résistant au *Basta*.

Selon lui, le principal inconvénient de l'utilisation éventuelle de colza transgénique résistant à un herbicide ne relève pas tant de la production d'hybrides interspécifiques tolérants que de la repousse ultérieure de colza transgénique : les graines tombées sur le sol restent à l'état dormant, en terre, durant plusieurs années. Or, on cultive de plus en plus des variétés de colza à usage spécifique, certains destinés à l'alimentation humaine (avec l'huile tirée des graines), d'autres à l'alimentation animale, d'autres encore à la production de lubrifiants ou de biocarburants. Les repousses d'anciennes plantations (transgéniques ou non) risquent de «polluer» la production : les graines dormantes d'un colza destiné à la production de lubrifiant risqueront un jour de repousser au milieu d'un champ destiné à l'alimentation humaine!

Les arguments d'Axel Kahn, qui a présidé la Commission de génie biomoléculaire vont dans le même sens : «Les principales difficultés tiennent à la dormance des graines et à la gestion des jachères, au fait que le colza est lui-même une mauvaise herbe pour certaines cultures, et à l'échange possible de pollen, même à grande distance. Au contraire, pour le maïs, il n'y a aucun risque de transmission d'un transgène, car cette plante n'a pas d'homologue sauvage en Europe. L'intérêt de cultiver un maïs résistant aux herbicides est réel. De même, en ce qui concerne la betterave, il y a un avantage notable à la rendre résistante, car on diminuerait la quantité de désherbant utilisé. Des gènes passent de la betterave sucrière vers la betterave sauvage, mais seule cette dernière fleurit la première année, ce qui permet son élimination sélective. En revanche, le tournesol présente les mêmes risques que le colza. Pour ces deux espèces, il convient de surseoir et de réfléchir encore.»

Marie-Thérèse LANDOUSY

Les fractions égyptiennes

Comment partager un entier entre un grand nombre de récipiendaires.

Il y a 3 500 ans, le scribe égyptien Ahmes indiquait sur le papyrus de Rhind comment on pouvait écrire une fraction sous la forme d'une somme de fractions de numérateur unité. Ainsi, 2/17 est égal à la somme de trois fractions dénommées depuis «égyptiennes» : 1/12 + 1/51 + 1/68. Deux mathématiciens, Greg Martin et Ernest Croot, ont étudié comment exprimer un entier sous la forme du plus grand nombre possible de fractions égyptiennes différentes. Le résultat pour 2 est indiqué sur la figure. Ainsi deux tartes peuvent être divisées en 366 parts, toutes inégales.

2 = 1/13 + 1/19 + 1/23 + 1/27 + 1/29 + 1/32 + 1/34 + 1/35 + 1/36 + 1/38 + 1/39 + 1/40 + 1/42 + 1/44 + 1/45 + 1/ 46 + 1/49 + 1/50 + 1/51 + 1/52 + 1/55 + 1/56 + 1/57 + 1/58 + 1/60 + 1/62 + 1/63 + 1/64 + 1/65 + 1/66 + 1/68 + 1/69 + 1/70 + 1/72 + 1/75 + 1/76 + 1/77 + 1/78 + 1/80 + 1/81 + 1/84 + 1/85 + 1/87 + 1/90 + 1/91 + 1/92 + 1/93 + 1/95 + 1/98 + 1/99 + 1/102 + 1/104 + 1/105 + 1/108 + 1/110 + 1/112 + ...

+ ... 1/870 + 1/874 + 1/ 875 + 1/880 + 1/882 + 1/884 + 1/891 + 1/896 + 1/897 + 1/899 + 1/900 + 1/910 + 1/912 + 1/918 + 1/920 + 1/924 + 1/928 + 1/930 + 1/931 + 1/ 935 + 1/936 + 1/945 + 1/950 + 1/952 + 1/957 + 1/960 + 1/952 + 1/957 + 1/960 + 1/966 + 1/969 + 1/975 + 1/980 + 1/986 + 1/988 + 1/990 + 1/992

NOMBRE DE CHIFFRES : 366

RMN/Chuzeville

La somme de *n* fractions égyptiennes consécutives, 1/1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 +... +1/*n* est supérieure à n'importe quel nombre, pourvu que *n* soit suffisamment grand, car la série est divergente. Toutefois, cette somme augmente très lentement, et la somme 1/1 + 1/2 + ... + 1/1000 est égale à 7,5 ; ainsi il serait impossible d'écrire le nombre 8 avec cette somme. Cela ne signifie pas que tous les entiers de 1 à 7 puissent être représentés par une somme de fractions égyptiennes différentes, de dénominateur inférieur à 1 000, car il faut choisir les termes de façon qu'après réduction au même dénominateur, le numérateur soit le multiple désiré du dénominateur. Ce fait d'armes est l'œuvre de Greg Martin. La question suivante est : quel est le nombre maximal de fractions égyptiennes de dénominateur inférieur à *n* ayant pour somme un entier ? La réponse est environ 0,3 *n*. Si l'on voulait partager deux parts de tartes entre un million de personnes, une personne, probablement la dernière servie, n'aurait qu'un trois millionième de tarte...

MIRACL, le laser destructeur de satellites

La guerre des étoiles est-elle relancée?

Le 25 octobre 1997, le Département de la défense américain tirait sur l'un de ses satellites avec un puissant laser : la volonté des militaires a été plus forte que la crainte des conséquences politiques. Depuis quelques semaines, un débat portait sur l'opportunité de l'essai d'une arme anti-satellite. Si certains craignent que cet essai ne marque le départ d'une course aux armements laser, d'autres considèrent, au contraire, ce type de laser comme une protection contre les satellites espions commerciaux qui pourraient être loués par des pays malveillants.

En France, les militaires interdisent aux civils la prise d'images spatiales dont la résolution au sol (la taille des plus petits détails que l'on peut distinguer) est inférieure à dix mètres. Avec l'envoi de satellites commerciaux dont la résolution est inférieure à cinq mètres, les militaires craignent que cet avantage stratégique ne soit utilisé à des fins hostiles. Dans les années 1980, aux États-Unis, le projet de la guerre des étoiles visait à construire des armes qui détruiraient les satellites ennemis ou les missiles nucléaires. Privé de crédits, il restait de ce programme quelques éléments, dont le laser chimique de grande puissance susceptible de détruire les satellites.

Comment concentrer de l'énergie à plusieurs centaines de kilomètres d'altitude ? Qui dit concentration d'énergie dit laser, mais pour obtenir une émission continue de grande énergie, la seule solution est le laser chimique, où l'énergie est stockée sous forme de combustibles chimiques. L'obtention d'une puissance équivalente avec des lasers à gaz nécessiterait l'utilisation permanente d'une importante centrale nucléaire.

Department of Defense

A l'aide d'un télescope de trois mètres de diamètre, les militaires pointent le laser MIRACL sur un satellite situé à plusieurs centaines de kilomètres d'altitude.

La source d'énergie du laser chimique MIRACL est un moteur de fusée. Dans une tuyère, on brûle de l'éthylène (C_2H_4) en présence d'un oxydant (le trifluorure d'azote). À la sortie de la tuyère, l'un des produits de la combustion, le fluor excité, est mélangé à du deutérium. Le deutérium se combine alors avec le fluor excité, ce qui produit des molécules de fluorure de deutérium excitées.

Placées dans une cavité résonante, les molécules excitées se désexcitent en émettant de la lumière cohérente : le faisceau laser, de longueur d'onde comprise entre 3,6 et 4,2 micromètres. Pour augmenter la puissance délivrée, les physiciens américains placent des tuyères en série, le laser étant constitué de dix lignes comportant chacune plusieurs tuyères.

Le faisceau obtenu est de forme rectangulaire (21 centimètres de large et 3 centimètres de hauteur), et des lentilles le transforment en un faisceau carré de quatre centimètres de côté. La qualité de faisceau du laser chimique est médiocre, en particulier, le faisceau diverge beaucoup. Aussi, pour concentrer la lumière sur le satellite, un volumineux appareillage optique est nécessaire.

Selon les militaires américains, l'objectif de cet essai est l'étude de l'impact d'un laser de haute puissance sur un satellite d'observation. Ces impacts sont pourtant étudiés depuis longtemps lors d'essais de laboratoire : avec les puissances en jeu, il est vraisemblable que l'on peut «griller» les détecteurs des satellites d'observation ; en revanche, il n'est pas concevable d'endommager le satellite proprement dit (système de navigation, panneaux solaires).

Le véritable enjeu est la précision : durant les dizaines de secondes que dure le tir, le satellite se déplace de plusieurs dizaines de kilomètres. Le système de suivi et de pointage du satellite doit être particulièrement maniable et précis pour que le faisceau laser intercepte en permanence le satellite. Cet essai est à rapprocher de l'ambitieux projet ABL (*Air Borne Laser*, soit «Lasers embarqués») qui consiste à équiper une flotte de *Boeing 747* avec des lasers chimiques. Les résultats de l'essai, classés secret défense, relancent la guerre des étoiles.

Digestion et somnolence

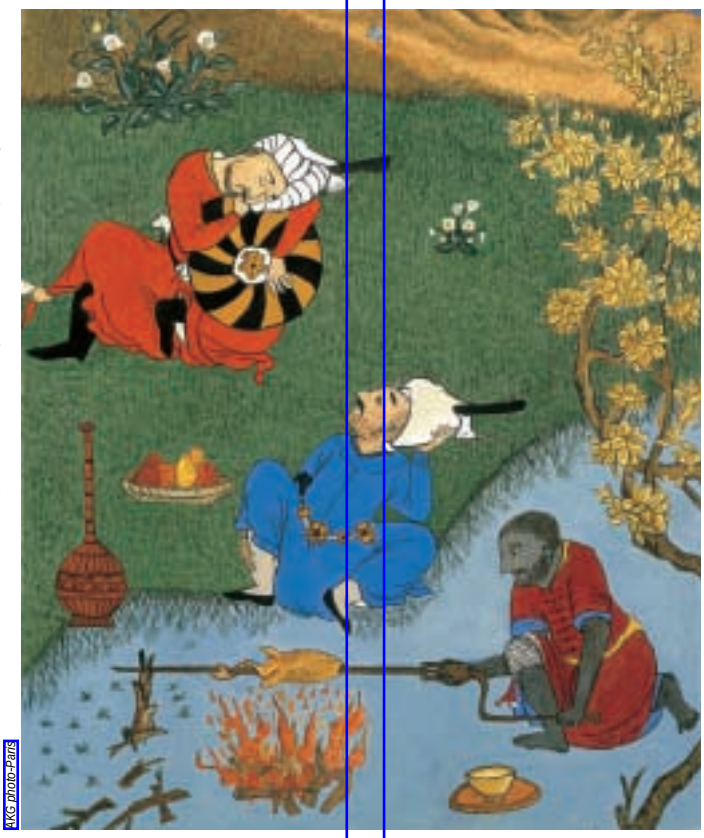
Le diamètre des vaisseaux sanguins varie en fonction des contraintes mécaniques sur la paroi vasculaire : les forces de pression s'exercent perpendiculairement à la paroi et les forces de cisaillement longitudinales, qui résultent du frottement du sang sur la paroi, sont d'autant plus intenses que la vitesse d'écoulement est élevée. Ces contraintes modifient le diamètre des vaisseaux qui s'adaptent au flux sanguin.

C'est notamment le cas lors de la digestion, quand l'activité métabolique augmente dans le tube digestif, nécessitant une élévation du débit sanguin. Quand le flux sanguin à la sortie du cœur augmente, la vitesse du sang dans les vaisseaux et les forces de cisaillement croissent. Plusieurs des récepteurs localisés à la surface des cellules musculaires lisses tapissant les vaisseaux ou à la surface des cellules endothéliales constituant la paroi vasculaire sont sensibles aux contraintes mécaniques engendrées par la pression et par le débit du sang.

Ainsi des canaux potassiques (contrôlant le flux des ions potassium à travers la membrane cellulaire) sont sensibles au cisaillement, tandis que d'autres canaux ioniques sont activés par l'étirement. Les variations du diamètre artériel dépendent des contraintes de cisaillement et des signaux reçus : l'augmentation de la concentration en calcium dans les cellules musculaires lisses déclenche la contraction, tandis que le même signal dans les cellules endothéliales augmente la production de monoxyde d'azote. Or ce médiateur déclenche une vasodilatation.

Pendant la digestion, les cellules endothéliales libèrent du monoxyde d'azote qui déclenche une relaxation du muscle lisse sous-jacent et une augmentation locale du diamètre des vaisseaux. Cette chaîne de réactions adapte la taille des vaisseaux irriguant le tissu digestif.

L'irrigation du tissu digestif se fait alors au détriment du système nerveux central. La diminution du débit sanguin dans le cerveau se traduit par une somnolence «physiologique», incitant à une sieste réparatrice. Pour éviter de somnoler après le déjeuner, on peut renforcer le débit sanguin dans les vaisseaux qui irriguent le cerveau, notamment dans les carotides, en mâchant du chewing-gum. Le fonctionnement des muscles de la mastication (les muscles masséter) augmente le débit sanguin dans les vaisseaux qui alimentent la face. Le débit cervical est maintenu et la vigilance améliorée. Pour éviter l'endormissement, mâchez du chewing-gum!



AKG Photo-Paris

Une sieste réparatrice au milieu du repas.

Éparpillement linguistique

Le cerveau traite différemment une seconde langue.

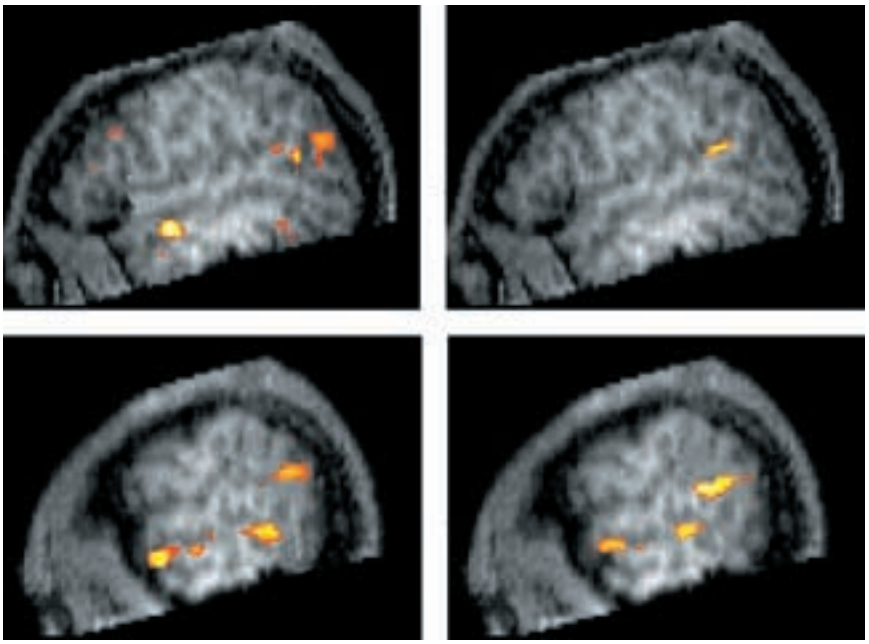
Les enfants comprennent leur langue maternelle, puis apprennent à la parler, sans qu'elle leur soit enseignée. L'écoute de leur entourage leur suffit pour saisir le vocabulaire, les principales structures grammaticales, la phonétique. Cette capacité n'est pas limitée à une seule langue : la majeure partie des enfants du monde, qui vivent dans un environnement polyglotte, apprennent plusieurs idiomes. Le traitement des langues acquises précocement s'effectue dans les mêmes zones cérébrales chez tous les locuteurs. En revanche, une langue apprise plus tardivement est traitée par des zones légèrement différentes chez chaque individu : la moins bonne adéquation de ces zones expliquerait les difficultés d'apprentissage des langues éprouvées par la plupart des adultes.

Comment notre cerveau traite-t-il les différentes langues que nous apprenons ? Depuis une dizaine d'années, Jacques Mehler et Emmanuel Dupoux, du Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistique, ont montré que notre façon d'entendre les sons d'une langue étrangère apprise tardivement est déformée de manière systématique par la langue maternelle. Autrement dit, il existe un «accent étranger» pour la perception du langage. Avec Stanislas Dehaene, du CHFJ/CEA et des collègues européens, ils ont observé l'activité cérébrale pendant l'audition, par imagerie de résonance magnétique. L'audition de la langue maternelle active, dans le lobe cérébral temporal (l'aire de Wernicke), des zones quasi identiques chez tous les individus.

Ces mêmes zones cérébrales sont aussi utilisées par les personnes qui ont appris une seconde langue pendant leur enfance : des différences existent dans le traitement des deux langues, mais les localisations sont voisines. En revanche, chez les personnes qui ont appris une deuxième langue après l'âge de 12 ans, l'audition de la deuxième langue active, toujours dans l'aire de Wernicke, des zones cérébrales différentes de celles activées par la première langue. En outre, ces zones sont différentes d'une personne à l'autre.

Une équipe américaine a obtenu un résultat semblable non plus pour l'audition, mais pour la locution, où les zones activées sont situées dans le lobe frontal, aussi nommé aire de Broca. Même chez des individus presque bilingues, les zones activées lorsqu'ils parlent leur seconde langue sont différentes de celles activées lorsqu'ils parlent leur langue maternelle.

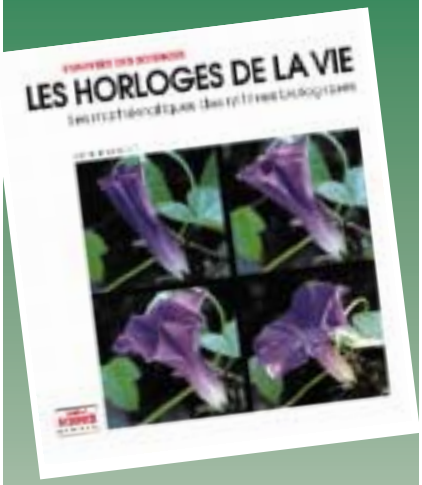
Avec l'âge, les zones très spécialisées dans le langage perdent ainsi une grande part de leur capacité d'acquisition. Une deuxième langue semble acquise comme n'importe quelle autre connaissance, en faisant plutôt appel à des stratégies et à la mémoire générale. Le traitement en est plus long, et la seconde langue est moins bien maîtrisée.



CHFJ/CEA

Les zones cérébrales activées *(montrées sur deux coupes)* lors de l'écoute de la langue maternelle *(le français, à gauche)* ou d'une seconde langue apprise tardivement *(l'anglais, à droite)* sont différentes.

L'UNIVERS DES SCIENCES



LES HORLOGES DE LA VIE

Des horloges internes déterminent la durée de notre sommeil et commandent plusieurs de nos fonctions physiologiques. Quand nous subissons un décalage horaire, ces horloges se recalent sur les variations lumineuses associées aux levers et aux couchers du soleil. L'un des meilleurs spécialistes des rythmes biologiques, Arthur Winfree, nous révèle le monde mathématique simple de ces resynchronisations.

192 pages – 190 F
Code 1860

POUR LA SCIENCE DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 98

Les faux souvenirs

ELIZABETH LOFTUS

La suggestion et l'imagination créent des souvenirs d'événements qui ne se sont jamais produits.

En 1986, Nadean Cool, aide-soignante dans le Wisconsin, consulte un psychiatre parce qu'elle ne parvient pas à faire face à un traumatisme vécu par sa fille. Au cours du traitement, le thérapeute utilise l'hypnose et d'autres techniques de suggestion pour savoir si N. Cool n'aurait pas elle-même été maltraitée et si elle n'en aurait pas refoulé le souvenir. Après quelques séances, N. Cool est convaincue qu'elle a effectivement été utilisée par une secte satanique qui lui aurait fait manger des bébés, l'aurait violée, lui aurait fait avoir des rapports sexuels avec des animaux et l'aurait forcée à regarder le meurtre de son ami âgé de huit ans. Le psychiatre finit par lui faire croire qu'elle a plus de 120 personnalités – enfants, adultes, anges et même un canard – en raison des abus sexuels et de la violence dont, enfant, elle a été victime. Le psychiatre pratique plusieurs séances d'exorcisme, dont une qui dure cinq heures et comprend une aspersion d'eau bénite et des hurlements destinés à faire sortir Satan de son corps.

Lorsque N. Cool comprend finalement qu'on lui instille de faux souvenirs, elle poursuit le psychiatre en justice. En mars 1997, après cinq semaines de procès, l'affaire se règle à l'amiable par une indemnité de 12 millions de francs versés par le psychiatre.

N. Cool n'est pas la seule à qui une thérapie douteuse a donné de faux souvenirs. Dans le Missouri, en 1992, un confesseur aida Beth Rutherford, une jeune femme de 22 ans, à se souvenir qu'entre sept et quatorze ans elle avait été régulièrement violée par son père pasteur, quelquefois aidé par sa mère, qui la tenait. Encouragée par le prêtre, B. Rutherford se souvint qu'elle avait été enceinte deux fois de son père, qui l'avait forcée à avorter seule, à l'aide d'un portemanteau. Lorsque ces accusations furent rendues publiques, son père dut abandonner son ministère, mais des examens médicaux révélèrent que la jeune femme était encore vierge et n'avait jamais été enceinte. En 1996, elle poursuivit le prêtre, qui fut condamné à une peine de six millions de francs.

Un an auparavant, deux tribunaux avaient condamné un psychiatre du Minnesota pour avoir induit de faux souvenirs chez deux de ses patientes, au cours de traitements par hypnose et par administration d'une drogue : les deux femmes avaient fini par «se souvenir» de sévices qui leur auraient été infligés par des membres de leur famille.

Ainsi, dans les quatre cas considérés, les patientes ont cru se souvenir de mauvais traitements subis durant leur enfance, mais elles ont pu ultérieurement montrer que ces souvenirs étaient erronés. Comment établir l'authenticité de souvenirs de maltraitance infantile? Sans corroboration, la différence entre les vrais et les faux souvenirs est difficile. Aujourd'hui, la fausseté n'est établie que lorsque les faits contredisent les souvenirs, par exemple lorsqu'un examen médical réfute une remémoration, fût-elle explicite et détaillée, de viol et d'avortement.

La désinformation

Pourrait-on trouver d'autres moyens de distinguer les vrais souvenirs des faux? Et pourquoi des personnes en viennent-elles à imaginer de faux souvenirs aussi élaborés? Plusieurs équipes de psychologie expérimentale explorent ces phénomènes et montrent comment on parvient à donner de faux souvenirs.

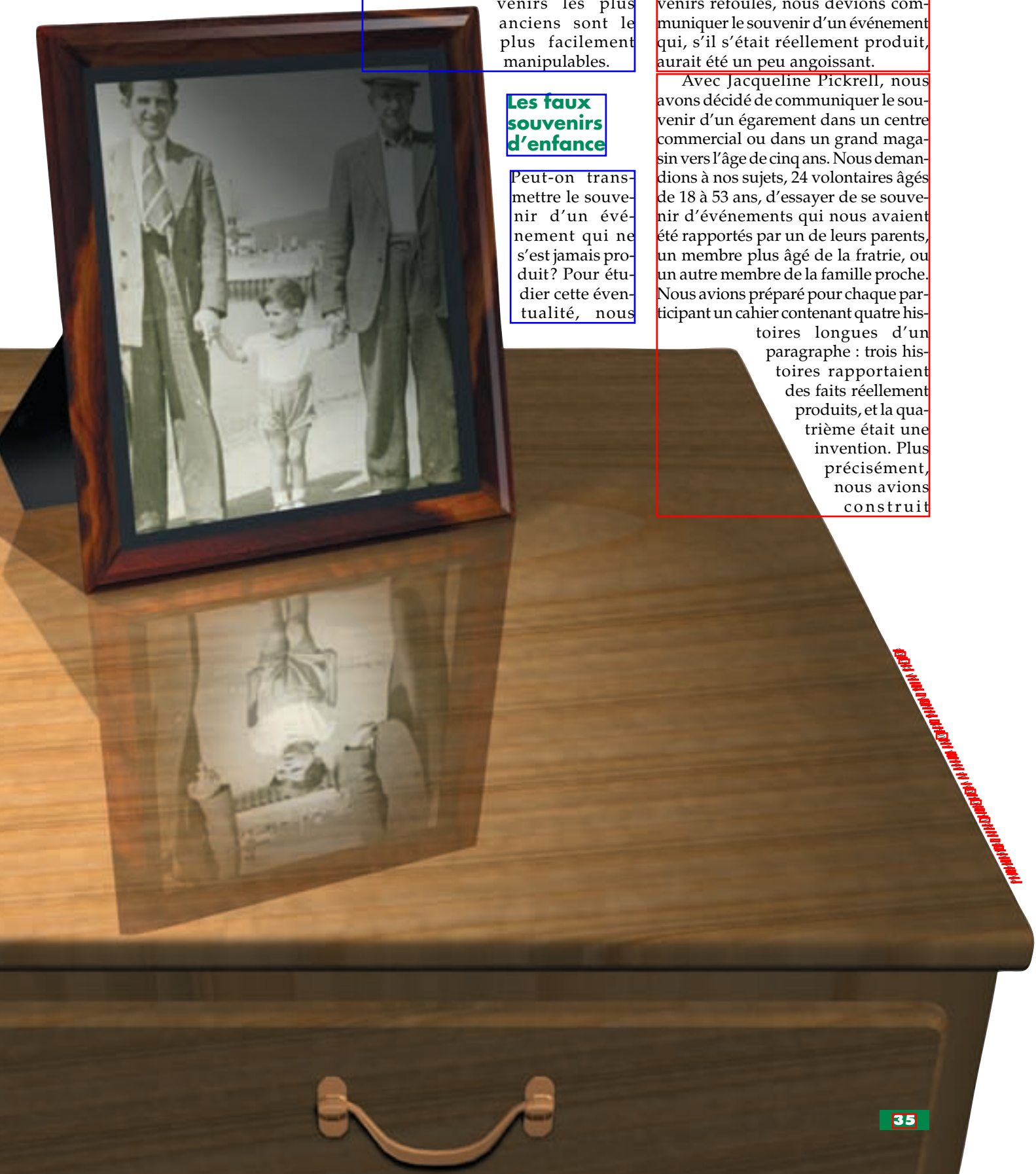
Mes recherches sur les distorsions de la mémoire remontent au début des années 1970, lorsque j'ai commencé à étudier les effets de la désinformation. Ces études montrent que, lorsque que l'on donne à des témoins d'un événement des informations nouvelles et erronées concernant ce dernier, leurs souvenirs sont souvent transformés. Dans une expérience, nous faisions assister des sujets volontaires à un faux accident automobile, à un carrefour où se trouvait un panneau «stop». Puis on suggérait à la moitié des sujets que le signal était en fait un panneau «cédez le passage». Lorsque l'on demandait ensuite de quel panneau les sujets des deux groupes se souvenaient, on observait que ceux qui avaient subi la suggestion se souvenaient plutôt d'un «cédez le passage» ; en revanche, ceux qui n'avaient pas subi de désinformation se souvenaient mieux du panneau.

Par plusieurs centaines d'expériences sur plus de 20 000 personnes, nous avons exploré comment l'exposition à de fausses informations altère la mémoire. Nous avons ainsi fait souvenir de la présence d'une étable dans une scène bucolique qui ne contenait pourtant aucun bâtiment, de la présence de verre brisé et de magnétophones dans des scènes visionnées où ces éléments étaient absents, de la blancheur d'un véhicule, qui était bleu, sur la scène d'un crime... L'ensemble de ces travaux montre que la désinformation peut modifier les souvenirs d'un individu de manière prévisible et, parfois, spectaculaire.

1. LES FAUX SOUVENIRS sont souvent composés par la combinaison de souvenirs réels et de suggestions des tiers. Le souvenir d'une promenade agréable au bord de la mer avec un père et un grand-père, par exemple, peut être transformé en un souvenir angoissé si un membre de la famille raconte qu'un drame s'est produit lors de cette promenade. Les faux souvenirs peuvent également être engendrés lorsqu'une personne est encouragée à imaginer qu'elle a vécu des événements spécifiques sans se soucier de leur réalité.

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

L'information erronée peut s'immiscer dans nos souvenirs lorsque nous parlons à d'autres personnes, lorsque nous sommes interrogés de manière évocatrice, ou lorsqu'un reportage nous montre un événement que nous avons nous-mêmes vécu. Après plus de 20 ans de recherches sur la puissance de la désinformation, nous connaissons mieux aujourd'hui les conditions qui rendent les personnes susceptibles à la suggestion. Nous avons notamment montré que les souvenirs les plus anciens sont le plus facilement manipulables.



Les faux souvenirs d'enfance

Peut-on transmettre le souvenir d'un événement qui ne s'est jamais produit? Pour étudier cette éventualité, nous avons cherché un protocole expérimental qui ne traumatiserait les sujets ni au cours de la création du faux souvenir ni lors de la révélation de la supercherie. Cependant, pour nous rapprocher des circonstances où l'on avait observé la résurgence de souvenirs refoulés, nous devions communiquer le souvenir d'un événement qui, s'il s'était réellement produit, aurait été un peu angoissant.

Avec Jacqueline Pickrell, nous avons décidé de communiquer le souvenir d'un égarement dans un centre commercial ou dans un grand magasin vers l'âge de cinq ans. Nous demandions à nos sujets, 24 volontaires âgés de 18 à 53 ans, d'essayer de se souvenir d'événements qui nous avaient été rapportés par un de leurs parents, un membre plus âgé de la fratrie, ou un autre membre de la famille proche. Nous avions préparé pour chaque participant un cahier contenant quatre histoires longues d'un paragraphe : trois histoires rapportaient des faits réellement produits, et la quatrième était une invention. Plus précisément, nous avions construit

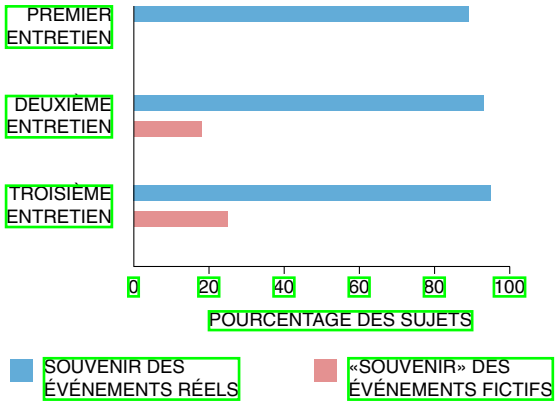
l'événement fictif à partir d'informations sur une sortie en courses plausible, fournies par un membre de la famille qui garantissait en outre que le sujet volontaire ne s'était pas perdu vers l'âge de cinq ans au cours de cette sortie. L'histoire d'égarement dans le centre commercial mentionnait notamment que le sujet s'était perdu longtemps, qu'il avait pleuré, qu'une vieille dame était intervenue pour le réconforter et, finalement, que la famille l'avait retrouvé.

Après avoir lu chaque histoire, les sujets écrivaient ce dont ils se souvenaient de l'événement décrit. Puis, au cours de deux entrevues ultérieures, nous avons expliqué aux participants que nous cherchions à analyser le nombre de détails dont ils se souvenaient, et à comparer leur mémoire à celle des membres de leur famille. Les résumés de chaque histoire ne leur étaient pas relus *in extenso*, mais nous donnions certaines parties afin de les aider à se souvenir. Les sujets se rappelèrent environ 49 des 72 événements vrais (68 pour cent) immédiatement après la première lecture du cahier, ainsi qu'au cours des deux entrevues suivantes. Après la lecture initiale des histoires, 7 des 24 sujets (29 pour cent) se «souvinrent», soit partiellement, soit complètement, de l'événement inventé et, dans les deux entrevues suivantes, six participants continuèrent de «se rappeler» cet événement fictif. Statistiquement, les vrais souvenirs différaient des faux : les sujets utilisaient un nombre de mots supérieur pour décrire leurs vrais souvenirs, et ils jugeaient ces derniers plus nets. Toutefois, sans disposer d'éléments de comparaison, un témoin qui aurait observé les sujets décrivant un événement n'aurait pu faire la différence.

Ce travail montre comment on communique à une personne le «souvenir» d'événements qui n'ont jamais eu lieu. Il a été poursuivi par d'autres équipes de recherche qui ont obtenu des résultats analogues. Par exemple, Ira Hyman et ses collègues de l'Université Western Washington ont demandé à des étudiants de premier cycle universitaire de se remémorer des expériences de leur enfance qui avaient été racontées aux psychologues par leurs parents. Les psychologues racontèrent aux étudiants que leur objectif était d'étudier comment différentes personnes se souviennent d'une expérience commune. Les chercheurs racontaient à chaque participant la trame des événements réels décrits par les parents et y ajoutaient un faux événement. Cet événement fictif, qui était soit une hospitalisation d'une nuit à la suite de fortes fièvres suggérant une otite, soit une fête d'anniversaire avec pizza et clown, était censé s'être produit aux environs de l'âge de cinq ans (les parents avaient confirmé que ces deux événements ne s'étaient jamais produits).

Les résultats montrèrent que les étudiants se rappelaient totalement ou partiellement 84 pour cent des vrais événements lors d'un premier entretien, et 88 pour cent lors d'un second entretien. Aucun des participants ne se rappelait le faux événement lors du premier entretien, mais 20 pour cent affirmèrent en avoir des souvenirs lors du deuxième entretien. L'un des étudiants à qui les psychologues avaient fait croire qu'il avait été hospitalisé se «souvint» même du médecin et de l'infirmière qui l'avaient traité, ainsi que de la visite faite par un de ses amis.

Au cours d'une autre étude, I. Hyman et ses collègues présentaient aux sujets diverses histoires qui leur étaient arrivées ou non ; parmi les mésaventures imaginaires, ils racontaient le renversement accidentel d'un saladier de punch sur les parents de la mariée au cours d'un mariage, ou une évacuation d'urgence d'un magasin où l'arrosage anti-incendie s'était déclenché. Puis les psychologues avaient trois entretiens avec les sujets. De nouveau, aucun participant ne se souvenait du faux événement lors du premier entretien, mais 18 pour cent se rappelaient quelque chose, à propos de cet événement, lors d'une deuxième rencontre, et 25 pour cent lors d'une troisième. Par exemple, un participant interrogé sur le renversement du saladier au cours du mariage déclara initialement : «Je n'en ai aucun souvenir. Je n'avais



2. LE SOUVENIR D'EVENEMENTS FICTIFS de l'enfance augmente légèrement lorsque le sujet s'est familiarisé avec les détails et que la source de l'information est oubliée. Ira Hyman et ses collègues ont présenté à des volontaires des événements réels rapportés par des membres de la famille, mélangés à des événements inventés – tels que renverser un saladier empli de punch sur les parents de la mariée, lors d'un mariage. Aucun des participants ne se souvenait de l'événement fictif lorsqu'il leur était rapporté la première fois, mais, au cours de deux entretiens consécutifs, 18, puis 25 pour cent des sujets disaient avoir des souvenirs de l'incident.

Photographies: Jason Goltz; Dessin: Bryan Christie

jamais entendu cette histoire.» La deuxième fois, il répondit : «La réception était à l'extérieur, et je crois que nous courions dans tous les sens. Nous avons renversé un saladier rempli de punch ou quelque chose comme ça. Il y en avait partout et, évidemment, on s'est fait gronder.»

L'inflation de l'imagination

Quelles leçons la justice ou la psychiatrie, par exemple, doivent-elles tirer de ces études? Bien que les policiers, qui mènent les interrogatoires de suspects et de témoins, ou les psychothérapeutes aient rarement recours aux techniques de suggestion, ils proposent souvent des exercices d'imagination. Par exemple, les policiers demandent parfois aux suspects d'imaginer avoir participé à un crime, et certains psychothérapeutes encouragent leurs patients à imaginer des événements de leur enfance afin de retrouver des souvenirs enfouis.

Des enquêtes faites auprès de psychologues cliniciens révèlent que 11 pour cent d'entre eux demandent à leurs patients de «laisser courir leur imagination», et que 22 pour cent proposent de «laisser libre cours à l'imagination». La thérapeute Wendy Maltz, auteur d'un livre sur les abus sexuels de l'enfance, conseille de dire aux patients : «Prenez le temps d'imaginer que l'on a abusé de vous sexuellement, sans vous soucier d'être précis, de prouver quoi que ce soit, ni de la vraisemblance de vos idées. Posez-vous ces questions : Quelle heure est-il? Où êtes-vous? À l'intérieur ou à l'extérieur? Que se passe-t-il? Y a-t-il une ou plusieurs personnes avec vous?» W. Maltz continue en recommandant aux thérapeutes de poser des questions du type : «Qui auraient pu être les acteurs probables? À quelle époque de votre vie étiez-vous le plus vulnérable aux abus sexuels?»

Quelles conséquences peut avoir le recours à ces exercices d'imagination? Que se passe-t-il lorsqu'une personne imagine des expériences de son enfance qui ne se sont pas produites? Risque-t-on de croire qu'un événement s'est produit, au cours de l'enfance, quand on l'imagine? Pour étudier ces questions, nous avons conçu une procédure en trois étapes. Nous avons d'abord demandé à des sujets d'indiquer la probabilité que 40 événements se soient produits au cours de leur enfance. Les sujets devaient évaluer cette probabilité à l'aide d'une échelle allant de «ne s'est absolument pas produit» jusqu'à «s'est produit avec certitude». Deux semaines plus tard, nous avons demandé aux participants d'imaginer qu'ils avaient vécu huit de ces événements, dont ils avaient dit qu'ils ne s'étaient pas produits. Les sujets différents devaient imaginer des événements différents. Puis nous avons de nouveau demandé aux sujets d'évaluer la probabilité qu'ils aient vraiment vécu les 40 événements.

Un des événements de la liste, par exemple, était le suivant : vous êtes chez vous, en train de jouer à l'intérieur, après l'école. Vous entendez un bruit étranger à l'extérieur, vous courez à la fenêtre, trébuchez, tombez et cassez une vitre avec la main en essayant de vous rattraper. Lors de la séance d'imagination, nous demandions aux sujets de se représenter très concrètement les situations. Par exemple, nous leur posions des questions du type : «Sur quoi avez-vous trébuché? Qu'avez-vous ressenti?»

Dans l'une de ces études, nous avons observé que le sentiment d'avoir réellement vécu l'événement de la vitre cassée était augmenté chez 24 pour cent des participants, mais chez seulement 12 pour cent ceux qui n'avaient pas imaginé l'incident. Cet effet d'«inflation de l'imagination» a été observé pour chacun des événements que nous avions demandé à nos sujets d'imaginer. Le fait d'imaginer un événement le rend plus familier, et la familiarité serait alors faussement associée aux souvenirs d'enfance. Une telle confusion – oublier la source d'une information – peut être particulièrement aiguë pour des expériences infantiles.

À l'Université de Washington, Lyn Goff et Henry Roediger ont complété cette étude en examinant des expériences vécues récemment afin d'établir plus directement les liens entre les actions imaginées et la construction

de faux souvenirs. Au cours d'une session initiale, les psychologues demandaient à leurs sujets soit de réaliser une action simple (frapper sur la table, soulever l'agrafeuse, casser le cure-dents, croiser les doigts, rouler les yeux), soit de s'imaginer en train de la réaliser, soit d'écouter simplement la description de l'action sans rien faire d'autre. Au cours d'une deuxième session, on demandait aux participants d'imaginer certaines des actions qu'ils n'avaient pas réalisées lors de la première session. Enfin, au cours de la dernière session, on leur demandait de répondre à des questions concernant les actions qu'ils avaient effectivement réalisées pendant la première session. Les résultats montrèrent que, plus une personne passe de temps à imaginer une action non réalisée, plus elle juge ultérieurement que cette action a bien eu lieu.

Des souvenirs impossibles

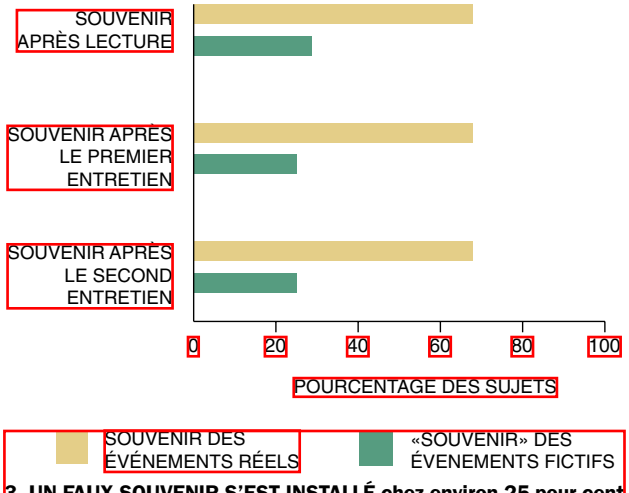
Afin de préciser ces observations, des psychologues ont voulu étudier les techniques de création de souvenirs. Les souvenirs concernant la première année de la vie sont perdus à jamais, notamment parce que l'hippocampe, qui joue un rôle important dans les mécanismes de la mémoire, n'est alors pas assez mature pour stocker des souvenirs recouvrables à l'âge adulte. Nicholas Spanos et ses collègues de l'Université Carleton ont d'abord expliqué à des volontaires que leur bonne coordination oculaire et leurs capacités d'exploration visuelle étaient probablement dues au fait qu'ils étaient nés dans des hôpitaux où des mobiles colorés étaient suspendus au-dessus des berceaux.

Les psychologues racontaient alors aux participants qu'ils voulaient vérifier s'ils avaient effectivement vécu cette expérience. La moitié des participants étaient alors hypnotisés, et on leur demandait de se souvenir du lendemain de leur naissance. L'autre moitié du groupe participait à une procédure de «restructuration mnémonique guidée», une technique de suggestion qui utilise la régression, ainsi que des encouragements actifs pour recréer des expériences du premier âge en les imaginant.

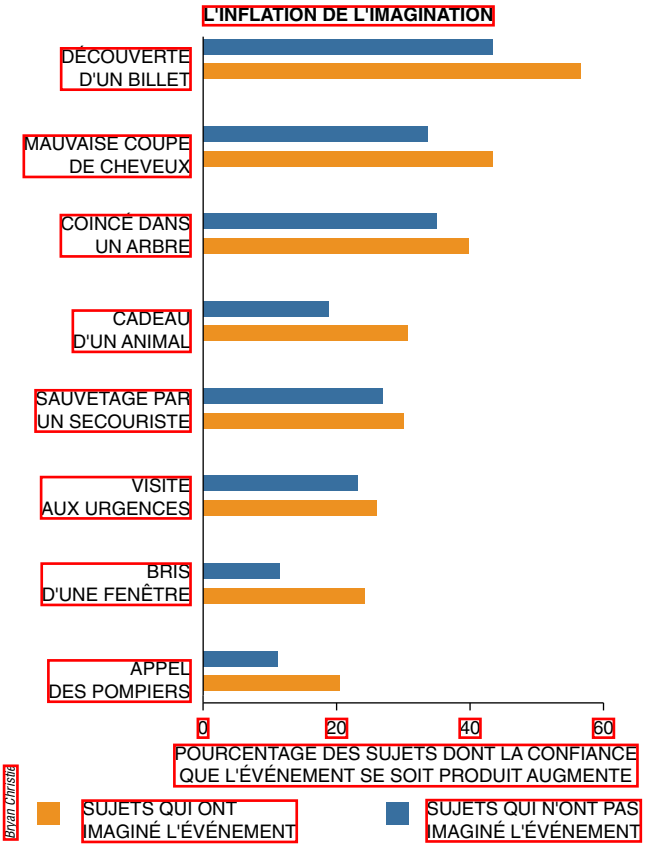
Les analyses ultérieures montrèrent que la grande majorité des sujets sont sensibles à ces procédures de suggestion des souvenirs : dans les deux groupes, des sujets rapportèrent des souvenirs de nouveau-nés. De manière surprenante, le groupe guidé se «rappelait» mieux son enfance que le groupe hypnotisé (95 contre 70 pour cent). La fréquence des souvenirs du mobile coloré était supérieure (56 pour cent dans le groupe guidé et 46 pour cent dans le groupe hypnotisé). De nombreux participants qui ne se souvenaient pas des mobiles colorés se «remémoraient» d'autres choses, comme les médecins, les infirmières, les lumières vives, les berceaux et les masques. De plus, dans les deux groupes, 49 pour cent des sujets qui faisaient état de souvenirs de la période néonatale pensaient qu'il s'agissait de souvenirs réels, contre 16 pour cent qui les attribuaient simplement à leur imagination.

Ces résultats, qui confirment les travaux antérieurs, montrent que l'utilisation d'une procédure de suggestion relativement simple suffit pour conduire nombre de personnes à construire des souvenirs complexes, vivaces et détaillés. L'hypnose n'est pas indispensable.

Dans l'étude que nous avions effectuée avec J. Pickrell, de faux souvenirs se créaient lorsqu'une autre personne, généralement un membre de la famille, déclarait que l'incident avait eu lieu. Saul Kassin, de l'Université Williams, a confirmé



3. UN FAUX SOUVENIR S'EST INSTALLÉ chez environ 25 pour cent des sujets participant à une étude réalisée par l'auteur et ses collègues. L'expérience consistait à créer le souvenir erroné de s'être perdu dans un centre commercial vers l'âge de cinq ans. Un cahier préparé pour chaque participant comprenait la description du faux événement d'égarement et celle de trois événements que le sujet avait réellement vécus. Après avoir lu les histoires, 29 pour cent des sujets se «rappelaient» vaguement s'être perdus dans le centre commercial. Des entretiens ont ensuite montré qu'au cours du temps les souvenirs des faux événements, comme des vrais, variaient peu.



4. L'IMAGINATION D'UN EVENEMENT FICTIF peut augmenter la conviction de sa réalité. Pour étudier cet effet, l'auteur et ses collègues ont demandé à des sujets d'estimer la probabilité que chacun des événements d'une série de 40 se soit réellement produit au cours de leur enfance. Deux semaines plus tard, ces sujets devaient imaginer certains des événements dont ils avaient dit qu'ils ne s'étaient pas produits. Puis on leur demanda d'évaluer à nouveau la probabilité de chacun des 40 événements. Pour tous les participants, la certitude que ces événements s'étaient produits augmenta.

Faux souvenirs et psychanalyse

Depuis quelques années, une violente polémique oppose, aux États-Unis, les tenants du Mouvement des souvenirs retrouvés *(Recovery Movement)* à ceux de la Fondation du syndrome des faux souvenirs *(False Memory Syndrome Fondation)*. Les premiers s'appuient sur l'émergence, au cours de psychothérapies, de «souvenirs» traumatiques jusque là enfouis, pour attaquer les agresseurs. La seconde association a été créée en 1992 pour dénoncer les excès des psychothérapeutes qui considèrent à tort la production de la mémoire après-coup comme la représentation authentique de la vérité historique.

Dans ce contexte, le propos d'E. Loftus ne consiste pas à dénoncer les techniques psychothérapeutiques ou psychanalytiques dans leur ensemble et encore moins à nier l'existence d'abus sexuels dans l'enfance. Cependant, elle met en garde contre les risques d'un usage perverti de certaines approches psychothérapeutiques qui tendent à assimiler l'imaginaire et le fantasme, à un souvenir de faits authentiquement vécus.

En ce sens, elle ne contredit pas l'idée centrale de la psychanalyse : Sigmund Freud après s'être appuyé sur l'idée du traumatisme subi dans l'enfance comme cause des troubles névrotiques, a très vite dû renoncer à cette hypothèse ; les souvenirs allégués par certaines de ces patientes sont des fantasmes. S'il peut y avoir traumatisme, c'est le fantasme lui-même qui est en cause. C'est ce renoncement même qui fonde les concepts essentiels de la psychanalyse : la sexualité infantile, le fantasme, la réalité psychique, le complexe d'Œdipe, etc.

Les thèses d'E. Loftus, censées recentrer le débat sur des critères scientifiques, ont pu être malheureusement utilisés par des personnes impliquées dans des affaires d'abus sexuels et qui tentaient ainsi d'invalider les témoignages de leurs accusateurs. Gardons-nous de tels excès et de mal interpréter ce travail.

Michel TOPALOFF,
psychiatre à Paris

que le faux témoignage d'un tiers engendre efficacement de faux souvenirs : une personne peut avouer une faute si un tiers dit avoir vu la personne commettre la faute.

Comment se forment les faux souvenirs

S. Kassin a ainsi étudié les réactions d'individus faussement accusés d'avoir endommagé un ordinateur en appuyant sur une mauvaise touche. Les participants innocents niaient d'abord l'accusation, mais, après avoir été confrontés à un complice de l'expérimentateur qui affirmait les avoir vus faire, de nombreux participants signèrent des aveux et finirent par décrire de façon détaillée... un acte qu'ils n'avaient pas commis.

Ainsi les expériences de psychologie expérimentale révèlent comment de faux souvenirs d'expériences émouvantes sont créés chez les adultes. Tout d'abord, les pressions sociales exercées sur l'individu peuvent aider l'apparition du faux souvenir ; par exemple, au cours de l'étude, les chercheurs exercent une pression sur les participants pour qu'ils retrouvent des souvenirs. Ensuite, on peut stimuler la construction du souvenir en demandant à la personne d'imaginer des événements, lorsqu'elle a des difficultés à se souvenir. Enfin, on peut les encourager à ne pas s'interroger sur la réalité de leurs constructions. Les faux souvenirs se créent facilement lorsque ces facteurs externes sont présents, dans une situation expérimentale, dans un contexte thérapeutique ou dans les activités quotidiennes.

Les faux souvenirs s'élaborent par combinaison de vrais souvenirs et de suggestions provenant d'autres personnes. Au cours du processus, les sujets sont susceptibles d'oublier la source de l'information. C'est un exemple classique de confusion de source, où le contenu et la source sont dissociés.

Les souvenirs d'enfance qui réapparaissent grâce à des suggestions ne

Crews/The Image Works

5. DES SOUVENIRS DE LA PÉRIODE NÉONATALE peuvent être suggérés – comme celui d'un mobile suspendu au-dessus d'un berceau, dans une maternité – bien que des souvenirs de la première année de la vie soient peu probables. Dans une étude, des «souvenirs impossibles» du premier jour de la vie ont été instillés, soit par hypnose, soit par l'intermédiaire d'une procédure de suggestion. Quarante-six pour cent du groupe de sujets hypnotisés et 56 pour cent du groupe guidé se sont «souvenus» du mobile.

sont pas nécessairement tous faux. Bien que le travail expérimental sur la création de faux souvenirs fasse douter de la valeur des souvenirs enfouis depuis longtemps, il ne les invalide absolument pas. En revanche, il montre que, sans corroboration, même un expert ne peut différencier les vrais souvenirs de ceux qui ont été créés par la suggestion.

On ignore encore les mécanismes précis d'élaboration des faux souvenirs. Quelles sont les caractéristiques des faux souvenirs créés? Ces faux souvenirs sont-ils durables? Toutes les personnes sont-elles «suggérables» ou existe-t-il des prédispositions physiques ou émotionnelles?

Les études, qui se poursuivent, conduisent déjà à mettre en garde les professionnels de la santé mentale et d'autres professions : ils doivent savoir qu'ils risquent d'influencer leurs patients et devraient limiter l'usage de l'imagination pour la résurgence de souvenirs supposés perdus.

Elizabeth LOFTUS, professeur de psychologie à l'Université de Washington, est présidente de l'Association américaine de psychologie.

Saul M. KASSIN et Katherine L. KIECHEL, *The Social Psychology of False Confessions : Compliance, Internalization and Confabulations*, in *Psychological Science*, vol. 7, n° 3, pp. 125-128, mai 1996.

Maryanne GARRY, Charles G. MANNING, Elizabeth F. LOFTUS et Steven J. SHERMAN, *Imagination Inflation : Imagining a Childhood Event Inflates Confidence That It Occurred*, in *Psychonomic Bulletin and Review*, vol. 3, n° 2, pp. 208-214, juin 1996.

Remembering Our Past : Studies in Autobiographical Memory, sous la direction de David C. Rubin, Cambridge University Press, 1996.

Daniel L. SCHACTER, *Searching for Memory : The Brain, the Mind and the Past*, BasicBooks, 1996.

E. LOFTUS et K. KETCHAM, *Le syndrome des faux souvenirs*, Éditions Exergue, 1997.

La préparation d'un grand séisme

ARMANDO CISTERNAS • LOUIS DORBATH • BERTRAND DELOUIS • HERVÉ PHILIP

Un tremblement de terre a dévasté la côte Nord du Chili il y a 120 ans. L'accumulation des contraintes tectoniques dans la région déclenchera bientôt une catastrophe semblable.

Le 13 août 1868, un séisme destructeur, d'une magnitude estimée à neuf sur l'échelle de Richter, frappe la côte Sud du Pérou. La rupture de la croûte terrestre sur une longueur de 400 kilomètres engendre un raz de marée. Federico Greve, ancien directeur du service sismologique au Chili, écrit en 1940 : «Le raz de marée a balayé sept fois le port d'Arica, atteignant une hauteur de 13 mètres au-dessus du niveau normal. Le port et la ville ont été réduits en ruines. [...] Le tsunami est arrivé, au Nord, jusqu'en Californie et, à l'Ouest, en Nouvelle-Zélande et en Australie après avoir traversé l'océan Pacifique. La région la plus touchée va de la ville d'Ica au Pérou jusqu'à Tarapaca au Chili, [...] les villes les plus détruites étant Arequipa, Moquegua, Arica, Tacna et Mollendo».

Selon un autre récit, «le tremblement de terre a duré cinq minutes, et la plupart des bâtiments sont tombés, la terre s'est ouverte et de l'eau a surgi. [...] Tout a été rasé, et deux bateaux de guerre, le *Wateree*, des États-Unis, et l'*America*, du Pérou, se sont échoués à plus de deux milles (près de quatre kilomètres) de la plage. La vague a arraché de lourdes pièces d'artillerie du fort, une locomotive et des wagons avec leur cargaison. Les maisons en argile ont été détruites, celles en bois ont été déplacées. [...] Le jour suivant, on a découvert le corps d'une femme en haut d'un palmier de l'Hôtel de France, ce qui indique la hauteur atteinte par l'eau.» Le Français Montessus de Ballore, pionnier de la sismologie et premier directeur du service sismologique au Chili rapporte que «Le tsunami a tellement secoué la banquise Antarctique qu'il s'en est détaché, tout à fait hors saison, de nombreux icebergs, plus tard rencontrés dans les mers australes loin de leur lieu d'origine.»

Neuf ans plus tard, le 9 mai 1877, un autre séisme rompt une autre faille de 400 kilomètres qui prolonge celle du Pérou le long des côtes au Nord du Chili, entre les villes d'Antofagasta et d'Arica. Un tsunami similaire détruit ce qui restait du port d'Arica et ramène la coque du *Wateree* vers la côte. Seule la chaudière de ce navire est longtemps restée sur la plage, témoignage des deux catastrophes. C'est le premier séisme observé à grande distance avec des instruments de mesure : Montessus de Ballore rapporte que, le 10 mai, Magnus Nyren, géophysicien à l'observatoire astronomique de Pulkowa, à Saint-Pétersbourg, vit un niveau osciller avec une période de 20 secondes environ ; le tremblement de terre chilien fut reconnu comme la cause de ces oscillations.

Depuis ces deux séismes voisins et de magnitude similaire, la terre tremble fréquemment dans la région, mais beaucoup moins violemment. Dans cette région, les tremblements de terre résultent des à-coups dans l'avancée d'une plaque tectonique sous une autre : des séismes semblables se répètent plus ou moins régulièrement aux mêmes endroits.

Le même phénomène d'enfoncement d'une plaque tectonique sous une autre, la subduction, est la cause de séismes dans de nombreuses régions du Globe, parmi lesquelles des régions très peuplées telles que la côte Ouest de l'Amérique du Sud, le Japon ou l'Indonésie. Pour prévoir l'arrivée de ces séismes et leur magnitude, afin d'édicter des normes de construction parasismiques adaptées et de conseiller les populations, préservant ainsi des milliers de vies humaines, les tectoniciens s'attachent à décrire en détail les mécanismes de la subduction. Paradoxalement, les tremblements de terre sont des moments privilégiés d'observation : c'est alors que les plaques avancent d'un coup l'une par rapport à l'autre.

La Terre ébranlée

La côte Ouest de l'Amérique du Sud est particulièrement intéressante : les paramètres caractéristiques de la subduction y ont des valeurs extrêmes ; la vitesse de convergence des deux plaques tectoniques est l'une des plus élevées au monde, dix centimètres par an en moyenne, et le frottement entre les deux plaques est aussi l'un des plus forts. Les séismes qui s'y produisent sont parmi les plus violents que nous connaissions. Ainsi, au Sud du Chili, en 1960, un séisme de magnitude 9,6 a accompagné la rupture de la croûte terrestre sur une longueur de 1 000 kilomètres (la distance de Lille à Marseille) : le tsunami engendré par le mouvement du fond marin a ravagé les zones côtières sur tout le pourtour du Pacifique ; pour la première fois on a observé les oscillations propres de la Terre dans son ensemble ; l'orientation de l'axe de rotation de la Terre a même été légèrement modifiée. Un tel séisme se répète tous les 128 ans en moyenne.

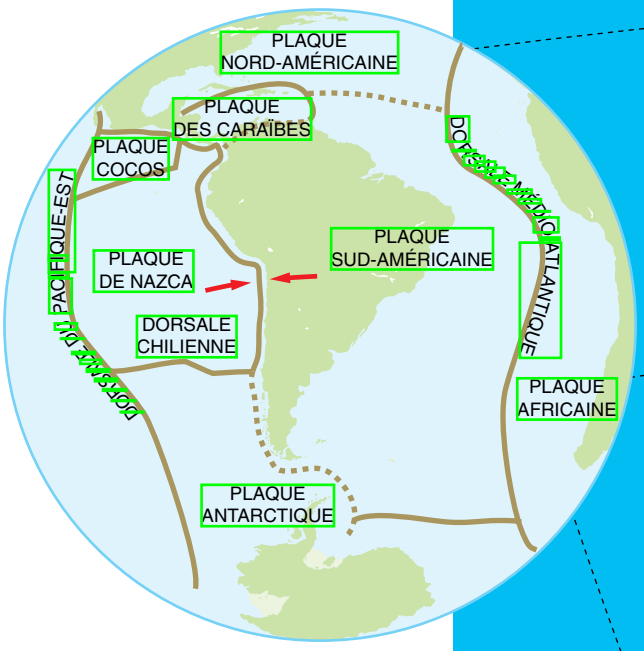
La situation extrême inverse se produit au niveau de l'archipel des

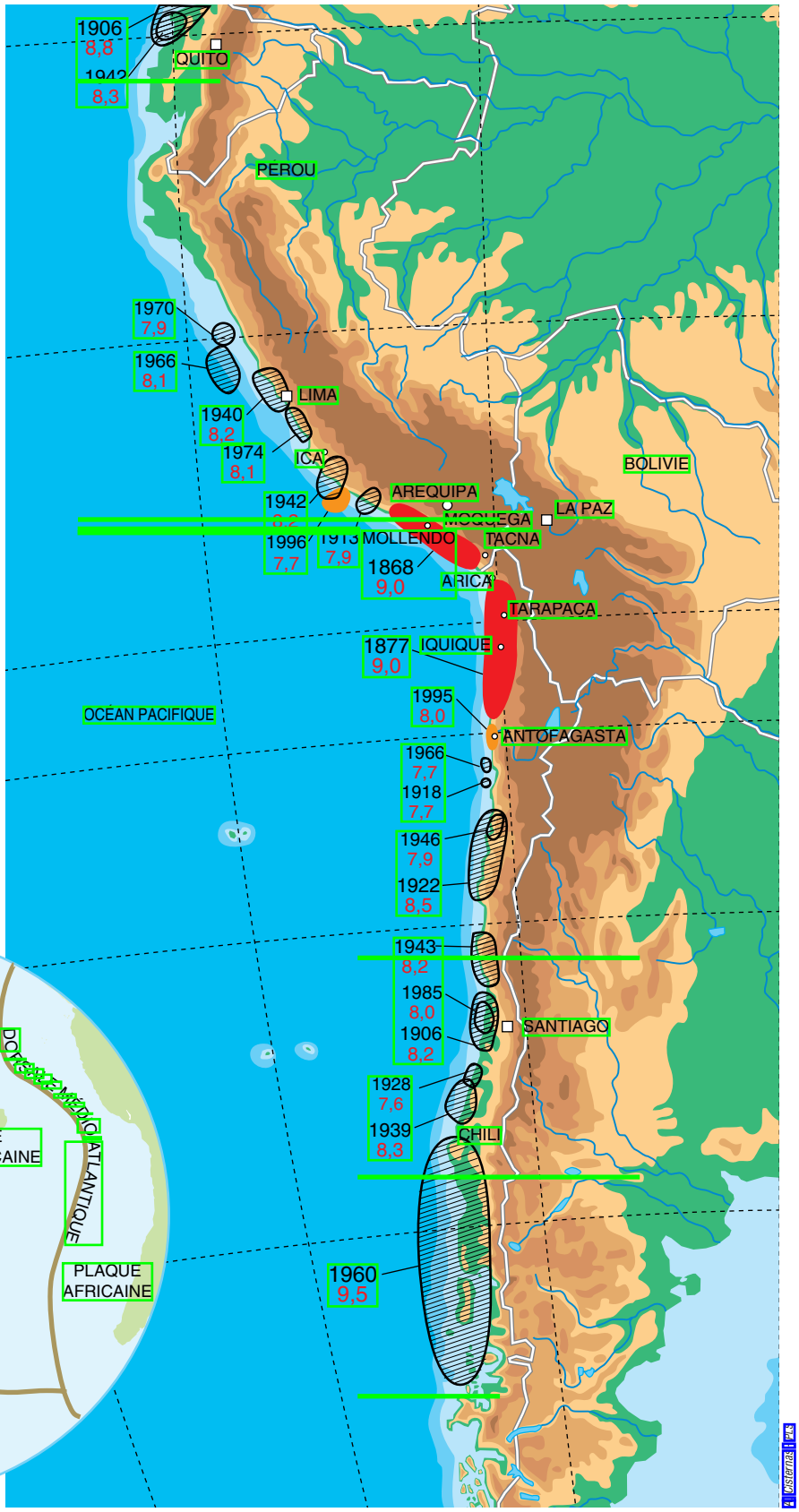
© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

Mariannes : la subduction de la plaque Pacifique sous la plaque des Philippines s'y déroule lentement (moins de deux centimètres par an) et avec un faible frottement. Les séismes, fréquents, n'y dépassent pas une magnitude de sept.

L'étude de la carte des séismes qui se sont produits depuis le siècle dernier sur cette côte *(voir la figure 1)* indique que le prochain grand séisme dans la région sera une répétition de celui de 1868 au Pérou ou de celui de 1877 au Chili. Ce sont les plus anciennes «lacunes sismiques» (zones de calme relatif) de toute la côte ; en outre, les deux plaques se sont rapprochées de 13 mètres depuis le séisme de 1868 (12 mètres depuis le séisme de 1877) et les glissements correspondants, sur la même largeur qu'au siècle dernier, produirait un séisme de magnitude neuf. Les conditions sont donc mûres pour le déclenchement de l'un des plus grands séismes du siècle.

Pour connaître la place de ces séismes géants dans l'histoire sismique de la région et, un jour, en observer un «en direct», nous étudions, depuis 1988, la sismicité dans la région touchée par le séisme de 1877. Nous avons enregistré la sismicité ambiante à son extrémité Sud, autour de la ville d'Antofagasta, d'abord avec un réseau temporaire de mesure, ensuite, depuis





1. LA COTE OUEST DE L'AMERIQUE DU SUD est l'une des régions du monde où se produisent les plus grands séismes *(on a porté en rouge, sous chaque année, la magnitude)*. D'ici une dizaine d'années, on assistera à la répétition du tremblement de terre de 1868 au Sud du Pérou ou de celui de 1877 au Nord du Chili *(zones en rouge sur la carte)*. Les séismes plus petits qui ont eu lieu en 1995 au Chili et en 1996 au Pérou *(zones oranges)* autour de ces zones indiquent que l'écorce terrestre est tout près d'y rompre. Cette activité sismique résulte du mouvement convergent de deux plaques tectoniques *(en bas, à gauche, les limites des plaques sont schématisées en marron)* : la plaque océanique de Nazca, qui prend naissance sur la dorsale du Pacifique Est, plonge sous la plaque Sud-américaine, qui se forme sur la dorsale médio-atlantique. Un fort frottement entre les deux plaques bloque le mouvement, qui ne se produit que par à-coups.

EROILLA

A. Ostermann

2. LE DÉFERLEMENT D'UNE VAGUE assez puissante pour déplacer deux navires de guerre, ancrés dans le port d'Arica, à près de quatre kilomètres sur le continent *(en haut, à gauche)* a accompagné le séisme de magnitude neuf qui a touché le Sud du Pérou en 1868. En 1877, un tsunami analogue, provoqué par un séisme d'ampleur similaire qui a touché une portion adjacente de la côte, au Nord du Chili, a ramené en mer la coque de l'un des navires, dont la chaudière est longtemps restée sur la plage *(en bas, à gauche)*. Au moins un séisme semblable se produira d'ici dix ans dans la région, tuant de nombreuses personnes : même si les constructions récentes érigées sur la plage de Chinchorro, à Arica *(à droite)*, résistent au tremblement de terre, elles seront balayées par le tsunami.

1990, avec un réseau permanent de huit stations qui envoient des signaux sismiques par radio à une station centrale.

Ces mesures, et nos études de terrain, éclairent les mécanismes tectoniques à l'œuvre dans la région et la répartition des contraintes mécaniques, en surface et en profondeur. Nous avons aussi déterminé la géométrie de la surface de contact et de frottement entre les deux plaques tectoniques. Nous avons enfin élaboré des modèles mécaniques de la déformation locale de la croûte terrestre : ils montrent que le mouvement de subduction est freiné jusqu'à la profondeur de 50 kilomètres. En 1995, un séisme de magnitude huit nous a donné l'occasion de tester et d'améliorer ces modèles.

Le chevauchement des plaques

La couche supérieure de l'écorce terrestre, la lithosphère, est divisée en une douzaine de plaques tectoniques, qui se déplacent. La lithosphère se forme dans les dorsales océaniques, par l'éjection de magma du manteau terrestre : ainsi, l'océan Atlantique s'ouvre par la croissance des plaques situées de part et d'autre de la dorsale médio-atlantique. Au Sud-Ouest, la croissance de la plaque Sud-Américaine, sur laquelle est posée la croûte continentale d'Amérique du Sud, entraîne le déplacement vers l'Ouest de cette dernière. Dans l'océan Pacifique, au large du Chili et du Pérou, la plaque de Nazca, qui prend naissance sur la dorsale du Pacifique Est, se déplace vers l'Est. Le long de la côte Ouest de l'Amérique du Sud, la plaque océanique de Nazca, plus dense, s'enfonce sous la plaque continentale Sud-américaine, à la vitesse moyenne de dix centimètres par an. Le signe le plus visible de cette subduction est l'existence d'une fosse océanique profonde, parallèle à la ligne de côte.

Ce mouvement de subduction est continu sur l'échelle des temps géologiques, mais saccadé à l'échelle humaine. Une forte friction le bloque et l'énergie correspondante est accumulée sous forme élastique dans les deux plaques, de part et d'autre de leur surface de contact. Lorsque les contraintes ainsi créées sont supérieures aux forces de friction, le glissement relatif des deux blocs se produit brusquement, engendrant un séisme dont la magnitude dépend à la fois de la longueur du glissement et de la taille de la surface sur laquelle il se produit. Le mouvement de la plaque de Nazca sous l'Amérique du Sud n'est en effet pas un mouvement d'ensemble : il se fait par segments, qui ne cassent pas simultanément.

La subduction de la plaque de Nazca sous la plaque continentale laisse des traces à la surface de la croûte terrestre : des failles, dont l'observation permet la reconstitution partielle de l'histoire des différents mouvements et la détermination des contraintes locales actuelles. Dans la région que nous étudions, la faille la plus importante est la faille d'Atacama, à peu près parallèle à la côte sur 1 000 kilomètres. C'est une faille «normale» : elle sépare la croûte terrestre en deux blocs qui tendent à s'écarter. Elle a certainement été activée lors du séisme de 1877 et elle garde mémoire de séismes plus anciens.

La faille d'Atacama n'est pas isolée : plusieurs failles quasi parallèles courent entre la côte et la faille d'Atacama *stricto sensu*. Par chance pour les sismologues, la zone de rupture du séisme de 1877 se situe au-dessous du désert d'Atacama, où la faiblesse de l'érosion favorise la conservation des escarpements et des failles formés lors des séismes. Le courant marin froid de Humboldt qui remonte de l'Antarctique le long des côtes chiliennes et péruviennes produit un phénomène d'inversion thermique au-dessus du désert : l'eau évaporée

à la surface de l'océan ne se condense pas en altitude au-dessus du continent, où il ne pleut que tous les dix ans en moyenne. L'humidité descend toutefois sur le sol du désert pendant la nuit, ce qui favorise, par capillarité, la concentration du salpêtre en surface. Les traces des failles sont donc particulièrement visibles. En outre, des coulées de boue, issues des rares pluies de la région, couvrent les failles et sont coupées à leur tour lors des séismes ultérieurs : elles permettent la reconstitution des mouvements de l'écorce terrestre autour des failles et l'établissement de leur chronologie relative.

Les orientations de ces failles et les mouvements des blocs de part et d'autre indiquent que l'écorce terrestre est en extension dans la direction Est-Ouest. La plupart des failles, parallèles à la faille principale, sont, comme elle, normales. En outre, les failles dont la direction est légèrement décalée vers le Nord-Ouest ou vers le Nord-Est sont le siège de mouvements latéraux en plus de l'extension normale : le bloc Est se déplace légèrement vers le Sud dans le premier cas, légèrement vers le Nord dans le second *(voir la figure 3)*. Nous verrons que cette zone d'extension, qui est un trait majeur en surface, n'est, malgré son ampleur, qu'une conséquence de l'activité sismique qui naît en profondeur à l'interface de subduction.

Une auréole sismique

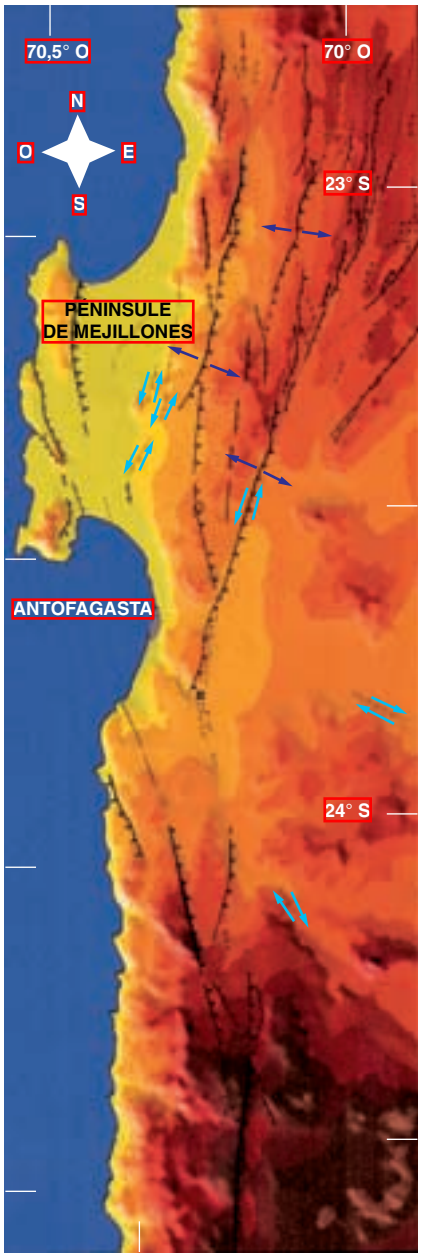
Nous avons, depuis 1990, enregistré la sismicité régionale. Des séismes, dont aucun ne dépasse une magnitude de 7,5, se produisent fréquemment. Leurs épicentres, projection en surface de leur foyer d'origine, sont distribués en auréole autour de la région du séisme de 1877 *(voir la figure 5)*. Plus remarquable encore est la concentration des séismes de magnitude voisine de sept dans cette auréole : ils résultent de l'accumulation des contraintes autour de la région qui doit rompre dans les années à venir.

Tous ces petits séismes sont les conséquences de ruptures à l'interface de subduction. La localisation précise de leurs hypocentres (foyers d'origine) nous a donc permis de dessiner cette interface *(voir la figure 6)*. Elle plonge sous le continent, de la fosse océanique au front volcanique qui surplombe le désert d'Atacama, à 250 kilomètres de la côte. En profondeur, à l'aplomb de ce front volcanique, l'activité sismique diminue : les conditions de pression et de température, aux profondeurs supérieures à 150 kilomètres atteintes par l'interface de subduction à cet endroit, entraînent l'amollissement et la fusion partielle des roches de la croûte océanique. Les composantes de la lithosphère se séparent : les moins denses remontent et sont éjectées dans des volcans.

Nos enregistrements nous indiquent aussi la répartition des forces le long de l'interface de subduction. Nous avons en effet calculé les orientations des plans de faille et les mouvements relatifs des blocs de part et d'autre de ces plans pour les séismes enregistrés par notre réseau entre 1990 et 1994. Aux profondeurs inférieures à 50 kilomètres, tous les séismes sont associés à des mouvements de compression. Aux profondeurs supérieures, les séismes sont associés à des mouvements d'extension. Nous en déduisons que la subduction est bloquée, parce que la friction y est trop forte, sur la portion de l'interface comprise entre la surface et 50 kilomètres de profondeur. En dehors de cette zone bloquée, la plaque océanique continue son mouvement : elle est comprimée au-dessus et elle est étirée au-dessous.

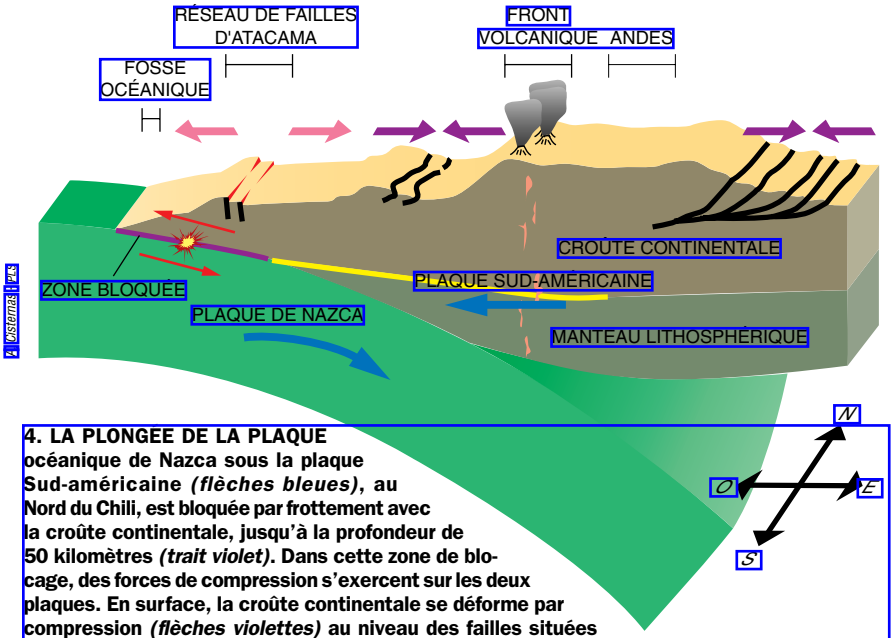
La profondeur de 50 kilomètres est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la croûte continentale, couche supérieure de la lithosphère continentale : cette croûte bloque la plaque océanique et l'empêche de plonger librement dans le manteau terrestre. Le manteau lithosphérique, couche inférieure de la plaque continentale, n'intervient pas dans le blocage *(voir la figure 4)*.

La zone de friction bloquée avant 1995 était située exactement au contact entre la plaque océanique et la croûte continentale. Cette observation, faite entre 1990 et 1994, a été confirmée par nos mesures lors du séisme de 1995.



A. Cisternas - PLS

3. LES FAILLES DU SYSTÈME D'ATACAMA, ici autour d'Antofagasta au Chili *(en haut)*, sont toutes le siège de mouvements d'extension de l'écorce terrestre *(flèches bleu foncé)* et, pour certaines, de glissements latéraux *(flèches bleu clair)*. La combinaison de tous ces mouvements est une extension globale Est-Ouest. Ces failles et les mouvements liés aux séismes anciens sont bien visibles à la surface du désert aride d'Atacama. Des coulées de boue d'une centaine de mètres de large *(zones sombres sur la vue d'avion)* qui coupent les failles *(en haut à droite)* et sont coupées par elles *(en bas à gauche)*, indiquent la chronologie relative et le sens des déplacements du terrain.



4. LA PLONGEE DE LA PLAQUE océanique de Nazca sous la plaque Sud-américaine *(flèches bleues)*, au Nord du Chili, est bloquée par frottement avec la croûte continentale, jusqu'à la profondeur de 50 kilomètres *(trait violet)*. Dans cette zone de blocage, des forces de compression s'exercent sur les deux plaques. En surface, la croûte continentale se déforme par compression *(flèches violettes)* au niveau des failles situées en aval du front volcanique et de celles situées à l'Est du massif andin. Lors d'un séisme *(étoile)*, un glissement se produit à l'interface entre les plaques *(flèches rouges)*. En surface, la croûte terrestre est alors brusquement étirée, dans la région des failles du réseau d'Atacama *(flèches roses)* : la partie de la plaque continentale située à l'Ouest de la faille avance vers l'Ouest, tandis que la partie Est reste bloquée. Aux profondeurs supérieures à 50 kilomètres, la plaque océanique, en contact avec le manteau lithosphérique, plonge librement. Vers 150 kilomètres de profondeur, les roches se liquéfient partiellement, les matériaux les plus légers remontent à travers la plaque continentale et ils sont éjectés par des volcans.

Le dernier maillon

Le 30 juillet 1995, un séisme de magnitude huit s'est produit sous notre réseau. Sa puissance le distingue de la sismicité ambiante. La rupture, sur 180 kilomètres de long, a rempli une «lacune de sismicité» au Sud de celle de 1877. La zone qui a rompu était le dernier élément qui empêchait la plaque océanique d'avancer du côté Sud de la lacune de 1877.

L'épicentre du séisme a été localisé au Nord de la zone de rupture. Un séisme de magnitude 7,3 s'était produit en 1987 au Sud de cette zone de rupture, réduisant les contraintes accumulées de ce côté. Un précurseur direct du tremblement de terre de 1995 a été le séisme de magnitude 6,2 du 10 décembre 1994, qui avait exactement le même épicentre. Ce précurseur a été suivi d'une période de calme autour de l'épicentre, interrompue seulement par trois petits événements de magnitude inférieure à quatre dans les trois jours qui ont précédé le séisme de juillet 1995. Ces observations illustrent la complexité du phénomène sismique : on sait reconstituer *a posteriori* la genèse des ruptures, mais il est autrement plus difficile de prédire le comportement futur d'une faille à partir des observations passées.

En utilisant les enregistrements du réseau sismologique mondial, nous avons retrouvé le sens de la propagation de la rupture au cours du temps. Nous utilisons pour cela l'effet Doppler : comme la sirène d'une ambulance, dont la fréquence semble plus aiguë lorsqu'elle s'approche de nous que lorsqu'elle s'éloigne, la fréquence des ondes sismiques dépend de leur direction de propagation par rapport à celle de la rupture. La propagation des ondes élastiques est plus complexe que la propagation du son, puisqu'il y a deux types d'ondes au lieu d'un seul, mais le principe reste le même. Dans notre cas, les stations qui sont au Nord du foyer enregistrent une onde de plus basse fréquence que celles qui sont au Sud : la rupture s'est donc propagée du Nord vers le Sud.

De manière plus détaillée, nous avons modélisé cette propagation de la rupture, validant le modèle par la comparaison des sismogrammes calculés avec ceux observés par le réseau mondial. Le modèle le plus satisfaisant consiste en une série de ruptures de tailles différentes, réparties sur 180 kilomètres le long de la faille qui a rompu, et qui démarrent à des instants différents, la durée totale étant de 70 secondes.

Nous avons aussi enregistré la succession des répliques pendant les 24 heures qui ont suivi le séisme principal. La bordure Nord de cette distribution est remarquablement nette et elle passe par le centre de la péninsule de Mejillones, dépression de 20 kilomètres de large qui rompt la continuité de la ligne de côte au Nord d'Antofagasta. Cette péninsule marque une barrière géologique qui a empêché la rupture de se propager vers le Nord. Plus précisément, la péninsule de Mejillones est l'expression en surface de la barrière existant en profondeur, à l'interface de subduction, et dont nous ignorons la nature exacte. Cette barrière avait aussi, en 1877, empêché la propagation vers le Sud de la rupture associée au séisme de magnitude neuf. À l'extrémité Sud de la rupture de 1995, la magnitude des répliques est moins grande : nous avons vu que le séisme de 1987 avait réduit la déformation cumulée dans cette zone, et donc l'énergie élastique accumulée localement dans les plaques.

La distribution en profondeur des hypocentres des répliques dépeint clairement la zone rompue : elle suit la surface de subduction déduite de l'observation de la sismicité ambiante, jusqu'à la profondeur de 50 kilomètres, où elle s'arrête *(voir la figure 7)*. La rupture associée au séisme de 1995 s'est donc produite exactement le long de la partie de l'interface qui était bloquée avant le séisme, c'est-à-dire celle située entre la surface et le bord inférieur de la croûte continentale. Ce résultat confirme que nous pouvons, en calculant la variation des contraintes en profondeur après chaque séisme, avec des modèles de rupture, mettre en évidence l'existence, la taille et la nature des régions prêtes à rompre.

Nous avons vérifié d'une autre façon, indépendante, la validité de notre modèle de propagation de la rupture principale : nous avons observé des déformations du terrain proches de celles calculées à partir du modèle. Nous avons mesuré ces mouvements de terrain par les changements du niveau de la mer dans la région côtière ou directement par des mesures de positionnement par satellite.

Ainsi, le calcul montre que le séisme de 1995 a soulevé une région ovale entre la côte et la fosse océanique, avec une valeur maximale de 1,2 mètre. Sur la bordure côtière, ce soulèvement atteint 10 à 15 centimètres, ce que nous avons observé. Entre la côte à Antofa-

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

gasta et la région stable à l'intérieur du continent, nos calculs indiquent un déplacement horizontal de 70 centimètres, en accord avec les données de positionnement par satellite.

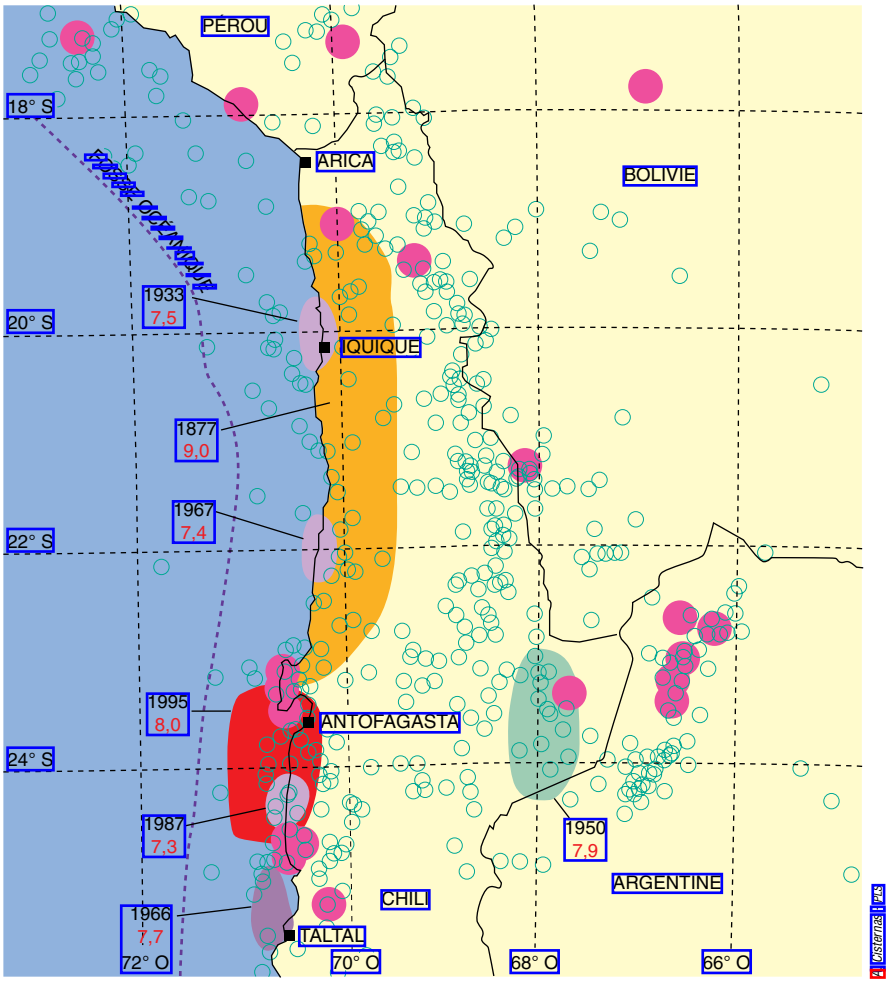
Toujours selon notre modèle, le déplacement horizontal, d'orientation dominante Est-Ouest, augmente lorsqu'on s'approche de la fosse océanique, ce qui implique que la croûte terrestre de la surface libre est étirée. Nous comprenons alors les caractéristiques tectoniques de la faille d'Atacama et des failles associées : à l'occasion de chaque séisme de subduction, la zone de la faille d'Atacama est soumise à des contraintes extensives. Il est donc naturel qu'elle soit activée à l'occasion. Ce fut le cas pour le séisme de 1995. Les ruptures de surface n'étaient pas de grande ampleur, mais clairement observables, en particulier dans le secteur de la Sierra Remiendos, environ 70 kilomètres au Sud Sud-Est d'Antofagasta. À cet endroit, les ruptures maximales ne dépassent pas 20 centimètres en extension et nous avons repéré les traces des failles activées sur quelques centaines de mètres.

La lacune encadrée

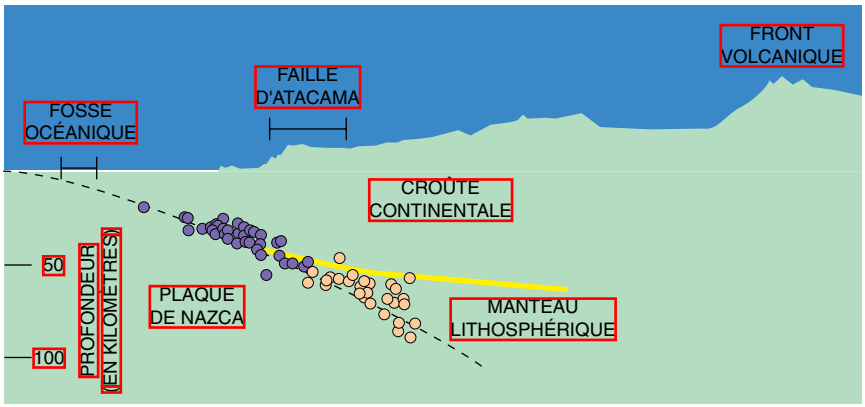
Le 12 novembre 1996, un séisme de magnitude 7,7 a frappé la région de Nazca, au Nord de la lacune sismique de 1868 au Pérou, entraînant des dégâts et des morts. La similarité avec le séisme de 1995 est frappante : ces deux séismes se situent aux extrémités de deux grandes lacunes de sismicité où se produiront des tremblements de terre de magnitude voisine de neuf d'ici à quelques années. Ils indiquent que la convergence des plaques de Nazca et d'Amérique du Sud n'est arrêtée maintenant que par les régions qui ont cassé en 1868 et 1877. Tout est donc en place pour la répétition de ces événements dans un délai de quelques années.

Où et quand cela se produira-t-il? L'une des conséquences du séisme de 1995 est l'augmentation de trois bars de la contrainte sur la partie Sud de la lacune de 1877 : la probabilité que le grand séisme attendu parte du Sud de la lacune a augmenté corrélativement. Le réseau permanent d'Arica et les études qui se développent actuellement dans cette région permettront la surveillance et la modélisation du processus de rupture à l'extrémité Nord de la lacune.

Reste la partie péruvienne : nous avons été malheureusement empêchés



5. LA PORTION DE LA COTE CHILIENNE touchée par un séisme de magnitude neuf en 1877 *(zone orange)* n'a pas connu d'événement aussi violent depuis. En revanche, de nombreux séismes plus petits se produisent *(les cercles verts sont les épicentres des séismes de magnitude comprise entre cinq et six, et les disques roses ceux des séismes de magnitude comprise entre six et sept enregistrés depuis 1980)*. Les épicentres des séismes de magnitude sept forment une auréole autour de la zone de calme relatif : les contraintes s'accumulent sur cette zone, ce qui annonce une prochaine rupture. Le séisme de magnitude huit *(zone rouge)* qui s'est produit au Sud en 1995 a aussi augmenté, de trois bars, les contraintes en profondeur. Il est associé à la rupture de la dernière zone qui empêchait le glissement de ce côté.



6. LES POSITIONS EN PROFONDEUR des épicentres des séismes enregistrés entre 1990 et 1995 dans la lacune de sismicité du Nord du Chili de 1877 tracent la surface de contact entre les deux plaques tectoniques *(pointillé)*. En outre, au-dessus de 50 kilomètres de profondeur, les séismes correspondent à des mouvements de compression des plaques *(disques violets)*, tandis qu'aux profondeurs supérieures, ils sont la conséquence de mouvements d'extension *(disques crèmes)*. La zone bloquée par le frottement entre les deux plaques, et qui rompra lors de la répétition du séisme de 1877, est comprise entre la surface et 50 kilomètres de profondeur : c'est la surface de contact de la plaque de Nazca avec la croûte continentale *(le trait jaune marque le bord inférieur de la croûte)*.

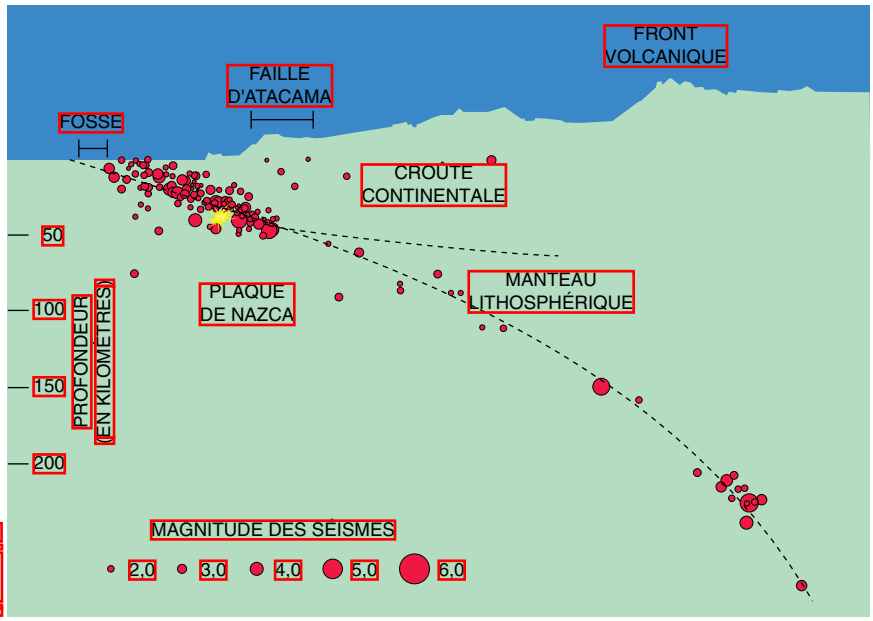
DES CAILLOUX DANS LES CHOSES SÛRES

Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui extraient de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques… le défaut de son condisciple.

144 pages - 65 F
Code 1897

POUR LA SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 98



Cisternas Pls

7. LES EPICENTRES DES REPLIQUES *(disques rouges)* du séisme de magnitude huit qui s'est produit sous la ville d'Antofagasta le 30 juillet 1995 *(étoile jaune)* sont placés sur la zone de plus fort frottement entre les deux plaques tectoniques. Cette zone est identique à celle déjà déterminée par l'observation de la sismicité ambiante. En outre, ces épicentres sont concentrés au-dessus de 50 kilomètres de profondeur, dans la zone de plus fort frottement.

de développer une collaboration avec nos collègues péruviens à cause de l'instabilité politique et militaire de ce pays. Nous espérons, les conditions devenant plus favorables, qu'une action similaire à celle du Chili pourra y être engagée par l'installation d'un réseau de surveillance de la lacune de 1868. Laquelle des deux lacunes rompra la première? Pourra-t-on trouver des éléments de prédiction à court terme?

Nous ne savons malheureusement pas répondre à cette dernière question. Ces prochains séismes nous fourniront de précieuses informations qui nous permettront d'améliorer encore nos modèles de la subduction. Toutefois, nous les attendons avec inquiétude : ils seront vraisemblablement meurtriers. Le séisme de magnitude huit du 30 juillet 1995 a peu détruit la ville d'Antofagasta et les régions voisines malgré sa puissance et son accélération maximale, qui a atteint 30 pour cent de celle de la gravité. Plusieurs raisons peuvent être invoquées : le foyer sismique était à 36 kilomètres de profondeur, assez éloigné des constructions ; la ville est construite sur la roche, ce qui évite l'amplification des ondes sismiques (au contraire des terrains sédimentaires mal consolidés tels que le sous-sol de Mexico) ; le code de construction parasismique en vigueur au Chili a été efficace. Toutefois, si un tsunami équivalent à ceux de 1868 et de 1877 se produisait, ce qui est plus que probable, les constructions qui remplacent aujourd'hui la chaudière du *Wateree*, sur la plage d'Arica, seraient inévitablement balayées.

Armando CISTERNAS est physicien à l'Institut de physique du globe de Strasbourg, où Bertrand DELOUIS a réalisé une thèse et où travaille aussi Louis DORBATH, directeur de recherches à l'ORSTOM. Hervé PHILIP est maître de conférence à l'Université de Montpellier.

L'écorce terrestre, Dossier *Pour la Science*, 1995.

La dérive des continents, Pour la Science, 1979.

B. DELOUIS, A. CISTERNAS, L. DORBATH, L. RIVERA, E. KAUSEL, *The Andean Subduction Zone between 22 and 25 °S (Northern Chile) : Precise Geometry and State of Stress*, in *Tectonophysics*, vol. 259, pp. 81-100, 1996.

B. DELOUIS, T. MONFRET, L. DORBATH, M. PARDO, L. RIVERA, D. COMTE, H. HAESSLER, J. P. CAMINADE, L. PONCE, E. KAUSEL et A. CISTERNAS, *The M_w=8.0 Antofagasta (Northern Chile) Earthquake of July 30, 1995 : A precursor to the End of the Large 1877 Gap*, in *Bulletin Seismological Society of America*, vol. 87, n° 2, pp. 427-445, 1997.

Les concours mandarinaux

RAINIER LANSELLE

Le recrutement des fonctionnaires de l'empire bureaucratique chinois se faisait par un concours qui a subsisté plus d'un millénaire.

Une pluie bienfaisante après une longue sécheresse,
La rencontre d'un vieil ami dans un lieu lointain,
La nuit de noces dans la chambre nuptiale,
La lecture de son nom sur la tablette dorée...

Les poètes lettrés célèbrent ainsi l'accession au rang suprême des fonctionnaires, assimilé à l'un des plus heureux moments de la vie : le nom des heureux lauréats étaient inscrits sur la «tablette dorée». Mis au point par les empereurs de la dynastie Song (960-1279), le système des concours mandarinaux a perduré jusqu'en 1904. Hérité de la pensée confucéenne, il répond à un besoin social d'ordre à base morale.

Alors que la Chine antique était féodale et morcelée en principautés rivales, la Chine impériale (221 av. J.-C. – 1911) est unifiée et bureaucratique. La bureaucratie chinoise est fondée sur une délégation du pouvoir du monarque, délégation qui ne doit pas entamer ce pouvoir. Aussi le personnel mandarinal est-il interchangeable et non spécialisé.

L'administration chinoise pendant l'ère impériale est une machine enflée, omniprésente, pensée comme un tout centralisé, mais innervant jusqu'aux plus ténues unités de l'espace social ; elle est conçue pour organiser une population nombreuse, sur un territoire immense où les différences géographiques, climatiques, humaines et culturelles sont notables.

Le corps des fonctionnaires comprend deux statuts différents : les *guan* et les *li*. Les *guan*, ceux que nous appelons les «mandarins», terme forgé par les Occidentaux à partir du portugais *mandar*, «commander», sont les fonctionnaires qui possèdent les sceaux d'une charge ; ils sont recrutés au terme des concours mandarinaux, titulaires des postes de responsabilité. Les *li*, fonctionnaires subalternes, hors grade (scribes, greffiers, chargés d'affaires, employés de la police, du fisc, des canaux, des relais routiers, etc.). Cette administration, complexe et exhaustive, fournira cependant un encadrement relativement lâche à l'échelle du pays, le nombre des cadres de l'empire (les *guan*) ne représentant qu'une très faible proportion de la population.

L'administrateur mandarin a conscience d'appartenir à une société paternaliste : il offre le modèle émulateur de sa propre personne, plus qu'il ne désire imposer une loi abstraite normative. Aussi sa formation et son recrutement doivent être exemplaires : les concours mandarinaux sont des exemples de vertus et de talents récompensés.

Recrutement des mandarins

Concours mandarinaux et concours militaires ont pour objectif le recrutement des cadres de l'empire bureaucratique, les fonctionnaires impériaux. Ils permettent la sélection de l'élite de la population et la dotation de l'empire en cadres administratifs et de défense de grande qualité et assez standardisés, cadres qui seront recrutés sur la base, non de la naissance, mais du mérite. Une longue et prestigieuse tradition associera intimement ces lettrés à l'option fondamentale de la pensée chinoise ancienne : une utilité civile et sociale de la morale individuelle.

Le principe de l'existence des concours est le fruit d'une transaction entre les pouvoirs militaire et politique du prince, et l'autorité concédée par la tradition à certaines élites. Il est fondé sur la préoccupation, originaire de la philosophie moraliste confucéenne, de permettre aux sages dispersés dans l'empire d'apporter au prince une contribution au bien général. Parallèlement, l'empereur a le devoir de s'entourer des meilleurs éléments, qui ne sauraient être issus nécessairement des classes supérieures. Sans renoncer totalement à une aristocratie (dont les charges ne sont pas, loin s'en faut, héréditaires), l'empire chinois, des Han (206 av. J.-C. –220) jusqu'aux Tang (618-907), abandonne néanmoins le système féodal et organise l'écrémage de la population afin de pourvoir aux besoins de sa bureaucratie ; c'est selon ce principe que s'établira, dès les Han, un recrutement d'abord fondé sur la recommandation. Ce système perdurera jusqu'aux Tang, cependant que mûrira l'idée d'examens écrits, repo-

1. HOMMAGE RENDU PAR L'EMPEREUR A UN LETTRE renommé : désirant le faire venir à la cour, pour le consulter sur le bon gouvernement, l'empereur lui envoie une chaise, dont il a fait garnir les roues de bottes de paille pour lui éviter les cahots de la routes, et de nombreux présents. En présence de l'empereur, le lettré répond : «Le bon gouvernement dépend surtout de l'exemple que donne l'empereur : que si un empereur n'est pas respecté et obéi, c'est qu'il ne pratique pas ce qu'il ordonne». En haut à droite, la tablette dorée sur laquelle les examinateurs inscrivaient les admis au concours mandarinal suprême. Au centre, le caractère «Zhong» : «Admis».

sant sur une imagerie idéale, d'ailleurs souvent représentée dans les documents iconographiques : celle du conseiller soumettant à son prince des propositions de bon gouvernement.

Le passage de la recommandation à l'examen se fait sous les Song (960-1279), à la faveur de la fixation d'un modèle idéologique : le néo-confucianisme. Les textes – les Classiques (ouvrages historiques, philosophiques, poétiques, rituels, remontant à la dynastie des Zhou), les Quatre Livresdu confucianisme – servent alors de norme dans des examens de masse ; il s'ensuit une standardisation des connaissances et un système rationalisé d'enseignement qui s'instaure avec les Song à la faveur de la prospérité générale de l'empire et de la diffusion du livre imprimé (Xe-XIe siècles).

L'esprit des examens

Le système des examens, solution d'équilibre mise au point après des siècles de recherche, répond à un ensemble de préoccupations. Il assure la préséance du prince, qui se réserve le droit souverain de faire venir à lui les sages de son empire. Il est acceptable par la classe lettrée, soucieuse

d'exercer un magistère politique et social et de jouer son rôle idéal, guider le prince par ses conseils tout en montrant la validité d'un système moral prévoyant la récompense de la vertu par la considération publique. Il est bien adapté à la démarche intellectuelle chinoise, qui procède moins par une réflexion dialectique et critique – antagoniste à l'idéal de sagesse – que par une importante capitalisation des connaissances, mettant en avant l'érudition (justifiée par le besoin d'intégrer des références reconnues comme canoniques) et la possession d'un stock de textes appris par cœur, donc faciles à sonder à travers les techniques d'examens.

De plus, il entretient l'idée d'une chance offerte à tous, donc intéressant chacun, malgré les frustrations engendrées par un État despotique et par une société étroitement bornée à la préservation d'un ordre public où la réussite mandarinale est parée du plus grand prestige. Enfin, il préserve un relatif équilibre entre les différentes classes de la société par la neutralité voulue du contenu des connaissances soumises à l'examen : peu techniques, celles-ci n'apparaissent pas comme l'apanage d'une classe particulière, et mettent en avant un projet d'ordre littéraire et philosophique confondu avec ce que le monde chinois considère comme le meilleur et le plus universel. Il présente ainsi l'avantage de sélectionner un personnel, sinon conforme idéologiquement, du moins censé partager une même vision du monde, cela dans un empire immense, qui doit lutter contre le morcellement.

Le système des examens synthétise ainsi un ensemble de conceptions et de pratiques consensuelles, et suscite chez les lauréats un sentiment exaltant : la fierté de faire une carrière honorable pour soi et pour sa famille et, plus encore, la certitude d'être acteur d'un projet à long terme, celui de la civilisation. Associée à des idées chères à la tradition chinoise, la classe lettrée sera du même coup extrêmement prestigieuse, la réussite sociale ayant fini par se confondre totalement avec l'appartenance au corps des *guan*.

Le système du *keju*, des examens mandarinaux – ou plutôt concours, étant donné la pratique bientôt systématique des quotas –, connaît son apogée sous les Ming (1368-1644) et sous les Qing (1644-1911) ; il s'impose comme moyen de recrutement des cadres impériaux malgré le maintien, sous la forme de la vieille institution du Collège des Fils de l'État, des reliquats d'un système d'origine plus aristocratique (créé sous les Sui, au VIe siècle, ce collège était une école destinée à former à l'administration les enfants nobles).

Les étapes des examens

Les examens sont organisés par l'un des Six ministères impériaux, le ministère des Rites. Ils comprennent trois étapes, dont les deux dernières seulement – les examens triennaux – donnent accès aux emplois publics. Les candidats aux concours mandarinaux doivent être inscrits dans un établissement d'État, le *ruxue* ou gymnase public, qu'ils intègrent après avoir subi au niveau de la sous-préfecture ou de la préfecture un examen, tenu deux fois en trois ans, qui leur confère le titre de *xiucai*, «talent éminent», mot que par convention l'on traduit généralement par bachelier. C'est la première étape. L'inscription au gymnase oblige à prendre part à de nombreux examens intermédiaires, dont les examens triennaux *(suikao)* ; ceux-ci visent, d'une part, à préparer les bacheliers aux examens de la province et, d'autre part, et surtout, à établir parmi eux un classement. Celui-ci établit des statuts très différenciés – moyen d'émulation – définissant une stricte hiérarchie entre les bacheliers ; ceux-ci sont répartis dans une bonne dizaine de catégories auxquelles sont parfois attachées des bourses prélevées sur le Trésor public, ainsi que des avantages dans le déroulement des études, avantages accordés notamment sous forme d'appuis et de recommandations. Ayant subi avec succès ces examens intermédiaires, les bacheliers, munis des indispensables attestations de leurs maîtres, sont autorisés à prendre part au *dabi*, à la «grande épreuve», c'est-à-dire aux concours proprement dits, qui commencent avec l'examen du second grade.

Dorling Kindersley Ltd

2. COPIE D'UN CANDIDAT annotée par un examinateur. Le circuit des différentes corrections était conçu pour éliminer différentes tricheries, notamment une possible identification du candidat.

Celui-ci donne accès au titre de *juren*, «homme présenté [au prince]», ou *xiaolian*, «fils pieux et homme intègre», dans la traduction conventionnelle : licencié. L'examen *(xiangshi)* est celui de la province, le cœur de tout le système, le titre de licencié étant le premier donnant droit – en principe – à un poste dans l'administration de l'empire.

Le cérémonial de l'examen

Très sélectif, l'examen se tient tous les trois ans à l'automne, à la huitième lune (vers septembre-octobre), dans chaque capitale provinciale. Le cérémonial, imposant, est apparenté au cérémonial de cour, les candidats étant assimilés aux sages qui répondent à l'appel de leur prince. L'examen a lieu dans une enceinte spéciale, véritable cité murée, dont les portes sont scellées au moment des épreuves, tenant enfermés candidats, examinateurs et un nombreux personnel.

Ces épreuves se tiennent en trois sessions, les *sanchang*, d'un jour chacune, portant sur des questions ciblées et des amplifications littéraires tirées des Quatre Livres et des Cinq Classiques, ainsi que sur un mémoire dans l'art du gouvernement. La rédaction des compositions obéit à des règles précises, où sont observées strictement les dispositions rhétoriques tradition-

nelles (on parlera ainsi de *bagu wen*, de textes rédigés selon les «huit périodes» successives de la rhétorique chinoise classique).

L'enfer de l'examen

Les candidats travaillent «en loge», dans des cellules individuelles où leur sont apportés leurs repas ; ils écrivent sur des cahiers qui leur sont remis à l'entrée dans la cité et sont marqués d'un chiffre, l'examen, qui ne comporte que des épreuves écrites, étant anonyme : il l'est à tel point que les membres du jury ne corrigent pas les originaux, mais des copies qui ont été faites à l'issue des épreuves par une foule de copistes. Ce jury est présidé par l'examinateur provincial, *zongshi*, haut fonctionnaire du ministère des Rites spécialement affecté à l'organisation des concours et à la présidence des jurys ; il est assisté par des chefs de section, *fangshi*, mandarins présidant l'une ou l'autre des sections *(fang)*. Dans ces sections, les candidats sont répartis en fonction des textes qu'ils ont choisi de présenter en tant qu'option particulière.

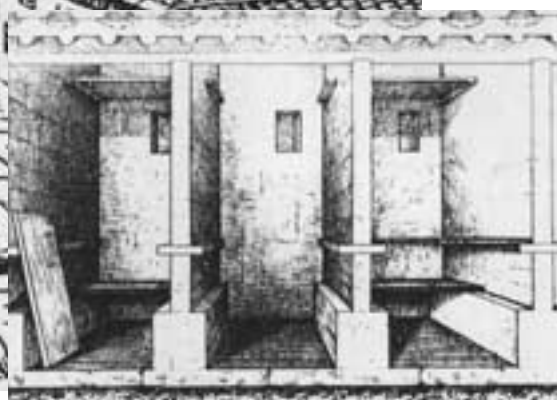
La tricherie est sévèrement punie, par la mort ou la déportation : tromper les examinateurs, c'est tromper l'empereur, donc être passible du crime de lèse-majesté.

On possède de nombreuses descriptions, conservées notamment dans des romans satiriques, de cet «enfer des concours mandarinaux», et de la minutie presque paranoïaque, comme de l'extrême ritualisation qui régnaient en ces occasions. Le goût du secret, le souci d'anonymat, la hantise de la tricherie donnèrent naissance à une infinité de règlements et de pratiques méticuleuses.

Ainsi, parmi le personnel qui était enfermé dans la cité des concours avec les examinateurs et les candidats, figuraient des imprimeurs, qui imprimaient instantanément sur place, au moyen de planches xylographiques, les sujets tirés des enveloppes scellées. La clôture des portes lors des épreuves ne souffrait aucune exception : on vit ainsi des candidats décédés sur le lieu de leurs tourments dont la dépouille fut portée au-dehors par une brèche que l'on fit tout exprès dans le mur, plutôt que de briser les scellés apposés aux portes. Les règles d'écriture des cahiers d'épreuves étaient particulièrement tatillonnes, et des fautes minimes étaient éliminatoires : un feuillet abandonné, un espace laissé vide accidentellement, un cahier taché, des omissions dans les copies au propre ou une erreur dans le décompte des caractères biffés ou raturés dont le nombre devait être indiqué à la fin du cahier, et l'on s'en allait rejoindre le gros bataillon des candidats éliminés avant même d'avoir pu atteindre le terme des trois épreuves d'une même session.

Très pointilleuses, par exemple, étaient les règles du *taitou*, ou règles d'«alinéas de déférence» que l'on devait observer en transcrivant le nom d'un empereur : une seule faute dans ce domaine, et c'était l'élimination, bien méritée sans doute par quiconque avait ainsi manqué à un souverain ! Si une telle minutie fait sourire aujourd'hui, elle nous rappelle aussi que celui qui se destinait, par la voie des concours, au service du prince devait parfaitement maîtriser les rituels et les coutumes, éléments fondamentaux du bon fonctionnement de la société chinoise.

La tricherie au moment de la remise des copies et des corrections était com-



3. LES EXAMENS MANDARINAUX se tenaient tous les trois ans dans des bâtiments spéciaux où les candidats étaient enfermés pendant plusieurs jours dans des cellules étroites. Là, ils rédigeaient leur copie sous la surveillance étroite d'examinateurs tatillons.

battue au moyen d'un système fort savant de couleurs : copistes, vérificateurs, greffiers, correcteurs, présidents, vice-présidents du jury, etc., chacun utilisait une encre de couleur différente : noire, bleue, violette, rouge, jaune, etc., chacune de ces encres correspondant à des zones cloisonnées de la cité des concours où elles étaient utilisées, zones entre lesquelles les membres du personnel n'avaient point le droit de circuler. Il était interdit de transporter une couleur d'un local à l'autre, et même d'en apporter avec soi, l'administration fournissant les bâtons d'encre.

Le personnel de surveillance, motivé par l'appât de grasses récompenses, avait, à l'entrée de la cité, un droit de fouille étendu, qui allait jusqu'aux sous-vêtements – certains candidats n'y avaient-ils pas recopié, en caractère minuscules, le texte intégral des Quatre Livres, avec commentaires ! À certaines époques, on dut se présenter avec des pinceaux au manche ajouré, puis avec des pierres à encre (indispensables pour la préparation de l'encre de Chine) d'épaisseur réduite ; quant à apporter de la nourriture, si la chose était permise, on s'exposait à voir ses petits pains impitoyablement éventrés.

D'autres tricheries, plus subtiles que les antisèches, étaient quant à elles infailliblement repérées par les correcteurs : ainsi certains mots répétés çà et là de façon suspecte dans le cours d'une même dissertation, et qui pouvaient être tenus pour des signes de reconnaissance. Toutefois, si l'on en croit les auteurs satiriques, que de candidats parvinrent à échapper aux mailles du filet ! Les plus heureux étant ceux qui avaient réussi à acheter par avance les sujets, à moins qu'ils ne les eussent reçus en songe de quelque divinité, certains temples célèbres pour leur efficacité dans ce domaine recevant des foules de candidats venus tout exprès s'y assoupir...

Les corrections, relectures et classements durent une vingtaine de jours, jusqu'au moment de la délibération finale du jury rassemblé dans la Salle de la Suprême Impartialité *(Zhi gong tang)*. Les résultats sont affichés publiquement sur des placards de papier jaune, couleur impériale, selon des dispositions graphiques indiquant la complexe hiérarchie instaurée entre les différentes catégories de lauréats – hiérarchies permettant là encore d'offrir aux bénéficiaires certains avantages particuliers.

Les heureux élus sont conviés à prendre part au «Banquet du Brame du cerf» *(Luming yan)* en compagnie des principaux de la province, des examinateurs et des sous-examinateurs, banquet qui préfigure celui dont l'empereur en personne honorera les lauréats du concours suivant, tenu au niveau de l'empire.

CHRONOLOGIE DES PRINCIPALES PÉRIODES ET DYNASTIES

"DYNASTIES" ARCHAÏQUES
Xia : environ XXIIIe siècle (?) – environ XVIIIe siècle (?) avant J.-C.
Shang : environ XVIIIe siècle (?) – 1122 avant J.-C.
DYNASTIE ROYALE – Époque de formation de l'espace chinois ; principautés rivales ; clans guerriers ; "féodalité"
Zhou : 1121-221 avant J.-C.
Zhou occidentaux : 1121-771 avant J.-C.
Zhou orientaux : 770-481 avant J.-C.
Printemps et automnes : 722-481 avant J.-C.
Royaumes combattants : 453-221 avant J.-C.

La fin des Royaumes combattants marque la fin de l'âge féodal. Avec Qin Shihuangdi, le Premier empereur (259-210 avant J.-C., règne sous ce titre 221-210), fondateur des Qin, commence la période impériale, qui comprendra certaines périodes de fragmentation, au cours desquelles des royaumes ou empires rivaux chercheront à unifier la terre chinoise à leur profit.

PREMIER EMPIRE UNIFIÉ QIN : 221-207 avant J.-C.
Han : 206 avant J.-C.-220 après J.-C.
Han occidentaux, ou antérieurs : 206 avant J.-C.-8 après J.-C.
Han orientaux, ou postérieurs : 25-220

PÉRIODE DE FRAGMENTATION – 222-589 : période des Six dynasties ("Médiévale")
Trois royaumes : 220-265
Wei : 220-265
Shu Han : 221-263
Wu : 222-280
Jin occidentaux : 265-316
Jin orientaux, Seize royaumes, Dynasties du Sud et du Nord : 317-589.
Réunification Sui : 589-618
Tang : 618-907

SECONDE PÉRIODE DE FRAGMENTATION : Cinq dynasties (au Nord) et Dix royaumes (au Sud) : 907-960

Réunification. Les grandes dynasties de l'âge classique
Song : 960-1279
Song du Nord : 960-1127
Song du Sud (sur la moitié sud du territoire seulement) : 1127-1279
Yuan (Mongols) : 1279-1368
Ming : 1368-1644
Qing (Mandchous) : 1644-1911

ÉPOQUE CONTEMPORAINE
République de Chine : 1912-1949 (depuis 1949 à Taiwan)
République populaire de Chine : 1949-

L'épreuve suprême : vers le titre de lettré accompli

Au printemps (troisième lune, vers mai-juin) de l'année qui suit celle où ont été tenus les examens provinciaux, les rares lauréats, heureux détenteurs du titre de licencié, se rendent à la capitale pour prendre part aux épreuves suprêmes, celles donnant accès au titre de *jinshi*, «lettré accompli» – convention de traduction : docteur. L'examen a lieu en deux étapes, dont la première, le *huishi* (examen préalable), n'est qu'une répétition du concours provincial, et dont la deuxième, l'examen suprême du Palais *(dianshi)*, ou examen de la Cour *(tingshi)*, est présidée par l'empereur.

Ce dernier examen se tient en une seule journée, avec rédaction d'un *ce*, ou sujet sur un thème politique. Le déroulement des épreuves est sensiblement identique à celui de l'examen provincial. Le contenu en diffère toutefois, par une plus grande place laissée à l'initiative individuelle, l'occasion étant donnée d'avancer des conceptions dans le domaine de la chose publique. L'examen consécutif, le *chaokao*, donne aux meilleurs l'accès à l'académie Hanlin (ou académie de la «Forêt des plumes», conseil de sages proches de l'empereur, responsables des archives impériales).

Au terme des épreuves, les docteurs sont répartis en trois classes, les *sanjia*, ou «trois pieds du tripode impérial», dont la première ne comprend que trois lauréats, les deux autres entre cinquante et deux cents. Sous les Ming, on recrute en moyenne 276 docteurs tous les trois ans pour servir à tous les échelons de l'administration, depuis les ministères jusqu'aux plus petites unités territoriales gouvernées par un fonctionnaire détenteur de sceaux, les sous-préfectures *(xian)* : proportion très faible au regard d'une population de plus de cent millions d'habitants. Malgré un fort accroissement démographique, les Qing n'augmenteront guère le nombre de ces grands cadres de l'empire.

Il existe aussi des examens militaires dont le système est calqué sur celui des littéraires. S'y ajoutent des épreuves pratiques.

Un exemple pour l'Occident?

Le système des examens chinois a fasciné les auteurs et les philosophes du XVIIIe siècle, en particulier en France et en Angleterre. Ce qui frappa nombre d'auteurs français était ce qu'ils prirent souvent pour le caractère «démocratique» du système : un système en principe ouvert à tous, et qui mettait en avant, non l'hérédité, mais bien le mérite et la compétence ne méritait-il pas en effet une telle épithète? N'annonçait-il pas à tout le moins une grande souplesse sociale? On sait combien Montesquieu (*De l'esprit des lois*, notamment Livre XIX) éprouvait une certaine gêne théorique lorsqu'il rangeait la Chine au nombre des régimes despotiques : on éprouvait par trop, vis-à-vis de cette Chine-là, le sentiment que le pouvoir y faisait l'objet d'un savant partage entre le prince et ses «lettrés-philosophes» pour qu'il fût possible de la classer dans la même catégorie que celle des despotismes orientaux.

Voltaire, le plus sinophile de tous les observateurs européens, admirera plus qu'aucun autre un État qui ressemblait si fort à son idéal du despotisme éclairé. Le «discours chinois» dans l'Europe du XVIIIe siècle est, on le sait, parmi les plus riches et les plus féconds de ce siècle d'idées. Fort concrètement, c'est en s'inspirant du modèle chinois, notamment sur la base d'écrits comme ceux de Quesnay, auteur du *Despotisme de la Chine*, ou d'Adam Smith, mais aussi sur la base des différentes théories de l'éducation et du recrutement des élites avancées durant toute la période de la Révolution française, que l'Europe, pendant toute la première moitié du XIXe siècle, entreprendra de mettre en place un système d'examens anonymes et rationalisés.

Ces examens aux programmes de plus en plus standardisés (à une époque de révolution industrielle, où c'est d'ailleurs toute production qui tend à la normalisation) se substitueront en grande partie au vieux système européen d'évaluation des personnes, système qui était moins fondé sur l'idée d'un sondage des connaissances que sur celle d'un passage à un état de pair au terme d'une phase d'initiation, état que l'on acquérait par sa capacité à convaincre de ses propres capacités – et cela par tous moyens possibles – ceux dont on prétendait devenir l'égal. Ainsi, chez les artisans, le «chef-d'œuvre» ; chez les clercs, la *disputatio* latine, dont le principe s'est conservé sous la forme du mémoire et de la thèse.

Si le développement en Europe d'un nouveau type d'examens, dont on peut dire qu'ils doivent au moins partiellement au modèle chinois, accompagne l'expansion de l'idée démocratique (l'examen comme chance offerte à tous, sans distinction de naissance ou de condition, mais aussi loin de toute obédience particulière), il convient de souligner combien une telle idée fut de tous temps étrangère à la Chine.

D'abord parce que la tradition chinoise, qui a si constamment pensé l'administratif, l'organisationnel (sur une base plus empirique que théorique), ne possède, *stricto sensu*, rien de ce que l'on pourrait véritablement appeler une pensée politique.

4. Sous-vêtement d'un candidat qui lui servait d'antisèche.

Pas de contestation

La constatation peut surprendre, dans un monde qui a si constamment médité sur le pouvoir et l'État, mais il est patent que le principe fondamental de ce que l'on pourrait appeler la «monarchie charismatique» chinoise n'a jamais été remis en question. Jamais on ne trouvera, chez aucun philosophe, et à aucune époque, quelque chose qui ressemblât à cette tradition occidentale du débat sur le politique qui, depuis l'Antiquité, théorise les différents types possibles de gouvernement – érigeant au passage l'intellectuel en juge critique de l'ordre politique lui-même.

Prisonnier d'une pensée de la royauté, le système chinois des examens a pour unique dessein d'organiser au mieux le «pouvoir royal» : il est dépendant d'une idée aristocratique, que cette aristocratie soit celle de la naissance ou celle «du cœur». Il s'est développé sur la notion de sagesse, et sur la capacité qu'a montré la pensée chinoise, vers la fin de l'époque

CONCOURS PROVINCIAL, NANKIN, 1889

Thème de composition littéraire pour la première épreuve, tenue à l'automne de la quinzième année de l'ère Guangxu, règne de l'empereur Dezong des Qing, le 9 de la huitième lune ; sujet tiré des Quatre livres ; sur chaque thème, rédiger une amplification raisonnée et référencée ; sept cents caractères environ par réponse.

«Il y a trois choses que l'homme de bien révère: il révère les dispositions du Ciel, il révère les hommes éminents, il révère les paroles des sages.»

«Pour celui qui comprend les cérémonies des sacrifices offerts au Ciel et à la Terre, et qui pénétrerait le sens des oblations offertes tous les cinq ans et à chaque automne aux mânes de ses ancêtres…»

«La visite du Fils du Ciel aux princes feudataires était dite Inspection des fiefs. Inspecter les fiefs, c'était se rendre compte par soi-même des terres de ses vassaux. La venue des princes feudataires à la Cour du Fils du Ciel s'appelait Compte rendu d'administration. Rendre compte de son administration, c'est exposer la manière dont on a géré les affaires.»

SUJET DE POESIE:

«Les eaux du Fleuve présentent les ombres précurseurs de l'automne. Les oies sauvages commencent à prendre leur vol. – Prendre le mot qiu (automne) comme type des rimes de cette pièce.» [Suit la désignation de soixante caractères de même désinence, you, liu, niu, zhou, jou, xiu, jiu, etc., entre lesquels les candidats devront choisir leurs huit rimes.]

féodale (fin de l'Antiquité), à développer l'idée d'une royauté symbolique qui était l'attribut du Sage. De même que Confucius était selon la tradition un «roi sans royaume», l'intellectuel chinois se considérera, tout au long de l'histoire, non pas tant comme un homme du peuple parvenant par ses compétences à des grades et faisant par là une ascension sociale (comme ce serait le cas dans un système démocratique) que comme un homme de mérite particulier, possédant une telle valeur personnelle qu'elle le faisait en quelque sorte, d'emblée et avant toute ascension sociale (donc hors compétence particulière), déjà l'égal du prince lui-même.

Comment alors, dans un monde profondément réglementé par les questions d'étiquette, obtenir l'attention du prince, et obtenir, en conséquence, un poste de considération, sans avoir l'air de forcer sa décision et sans avoir à se placer au-dessus de lui (position intenable, car la Chine, avec ses fondements despotiques, n'aurait pas toléré de tels manquements aux principes hiérarchiques)?

La chance pour l'intellectuel, pour le lettré, viendra de ce qu'à l'époque impériale (à partir des Han) le pouvoir du prince éprouvera le besoin de se justifier d'un point de vue moral. Il n'y a pas de conception, en Chine, de monarchie de droit divin et, par ailleurs, les dynasties sont fort conscientes de n'être jamais assises que sur les coups d'État réussis qui les ont fondées : elles connaissent la fragilité de leur statut ; à la recherche de sa légitimation, l'empire trouvera ainsi ses appuis, non pas dans un ordre religieux (en l'absence, en Chine, d'une pensée de la transcendance), mais moral. L'attente de l'intellectuel (rapidement identifié avec le moraliste de l'école confucéenne) et celle de l'empereur se rencontreront alors sur ce principe : l'empereur délègue au Sage une partie de son pouvoir, lui donne ce qu'il recherche – un magistère idéal sur le siècle –, en échange de quoi le Sage justifiera, en le déclarant légitime parce que voulu «par le Ciel» (autrement dit, par l'ordre des choses, par l'état de fait), le pouvoir guerrier du prince.

La stratégie chinoise, particulièrement complexe, des relations interpersonnelles et de l'étiquette fera le reste : chacun des deux pouvoir – celui de l'empereur, capable de donner des charges, et celui des clercs, capable de dispenser de la légitimation politique –, fera une moitié de chemin vers l'autre, montrera qu'il tient l'autre en considération, l'assurant que cette démarche n'a d'autre motivation que celle du bien public. D'où l'idée, émanation naturelle d'une tradition nationale par ailleurs très portée à la valorisation du littéraire, de ces dissertations soumises à l'appréciation de l'empereur, et devant servir à la bonne administration du monde.

Le point de rencontre, en somme, situé à mi-chemin, entre deux intérêts contradictoires. Nous avons vu que c'est bien cette idée de la collaboration fructueuse prince-ministre qui couronne toute la pyramide du système des examens (idée d'une épreuve tenue face à l'empereur), ce système n'étant que le résultat des tâtonnements empiriques consentis au cours des siècles pour atteindre à ce résultat idéal.

Un ascenseur social efficace

Il fallait que, pour accepter d'affronter un si rude parcours, l'intellectuel chinois recueillît du système un grand prestige personnel : c'était le cas. Le système fut envahissant, et il finit par s'identifier totalement, et exclusivement, à l'idée, en Chine, de réussite sociale. Hommes d'État, penseurs, intellectuels, auteurs, poètes, tous prirent part aux concours, tous, surtout, reçurent une formation humaniste dont le contenu avait fini par se confondre avec le contenu même des examens. Une grande partie des grands noms de l'histoire chinoise durent de rester dans les mémoires parce que la voie d'accès qui les conduisit à des états de considération passa par les concours, cela dans une tradition qui, sinon méprisait, du moins regardait comme secondaire tout ce qui n'était pas l'administration : le commerce, les sciences, les techniques, la médecine…

Le lettré avait intérêt à la conservation de l'état social, car combien exaltant devait être un système qui justifiait sa prétention à une «royauté symbolique». Son savoir, ses compétences étaient peu techniques, mais très littéraires, et aussi générales que possible. C'est que, selon le mot de Confucius, «le Sage n'est pas un pot», autrement dit il ne sert pas qu'à un usage exclusif : son savoir ne compte pas tant comme savoir particulier que comme moyen de s'identifier aux vertus mêmes du Ciel, de ce Ciel puissant,

5. L'EMPEREUR QIN SHI HUANGDI(221-210) fait brûler certains livres et précipiter dans une fosse les lettrés qu'il accusait de propager des idées subversives.

indistinct, toujours juste, jamais entravé parce qu'il est l'ordre même, inaltérable, de la nature, de ce Ciel dont l'image fondatrice a servi de modèle à l'image du Sage lui-même. En n'étant enfermé dans aucune technique particulière, le Sage possède virtuellement toutes les techniques à la fois : compétent dans rien parce que fondamentalement de formation philosophique, impartial et neutre comme l'ordre souverain du Ciel, le mandarin sera justifié à revendiquer sa compétence dans tous les domaines simultanément : justice, finance, police, ordre public, affaires civiles et militaires, mais aussi poésie, littérature et, en définitive, compétence dans le maniement de tous ces signes d'un monde vu comme profondément codifié, et qui demande pour son intelligence des hommes immensément érudits. Tout est de son ordre, tout réclame son aptitude universelle, tout s'en remet à ses lumières : par sa fonction, le lettré chinois est l'émanation et, en cela, l'égal du prince.

Cette tradition valorisante, qui caractérise le statut exceptionnel de l'intellectuel dans le monde chinois, annonce aussi les difficultés qui résultent de sa survalorisation. Si l'on voit le lettré souvent animé du sentiment d'urgence qui l'appelle à «sauver la nation», c'est bien sur le champ de sa prééminence morale bafouée qu'il fondera son discours, autrement dit sur une démarche visant à restaurer son pouvoir en tant qu'attribut naturel d'une classe d'élite, et non sur un discours «démocratique», qui lui demanderait de consentir à un idéal d'égalité. Cet idéal serait contraire tout à la fois à sa prétention de magistère sur le siècle et aux privilèges qui lui sont dus en conséquence.

Pérennité du statut de l'intellectuel chinois

L'intellectuel chinois mérite ses privilèges en raison des grands risques personnels qu'il encourt en étant depuis toujours l'interlocuteur attitré du pouvoir et son délégué auprès du peuple. Ces risques sont réels : des crises récentes ont illustré la pérennité en Chine d'une certaine fonction de l'intellectuel comme fusible quelque peu «sacrificiel». Tout en interpellant, quelquefois crânement, le pouvoir, ce même intellectuel n'en possède pas pour autant les moyens de se détacher de lui, d'où un sentiment parfois très grand de désarroi et de frustration.

En Occident, le philosophe du XVIIIe siècle, puis l'intellectuel du XIXe et du XXe siècle sont héritiers, depuis Platon, d'une fonction antagoniste de la parole et d'une conception critique du pouvoir politique. Ils placent naturellement le philosophe à côté du pouvoir et non en son sein, sont les ferments, puis les agents des rénovations sociales et politiques. Au contraire, l'intellectuel chinois appartient à une catégorie sociale et culturelle constituée autour de l'idée de service du siècle et d'harmonie «familiale» de l'État, mais aussi autour de l'idéal d'une heureuse réciprocité du prince et du philosophe.

Cette vision, terriblement idéaliste, a des conséquences quelquefois cruelles : face aux réalités de ce pouvoir, et à son arbitraire, l'intellectuel sera exposé à des déceptions souvent intensément ressenties. Contre le désespoir que représenterait une telle perte de sa raison d'être, il sera alors rapidement tenté par des solutions à certains égards régressives : retraite, érémitisme, esthétisme, hédonisme par exemple.

Rainier LANSELLE, sinologue, enseignant de chinois, auteur de plusieurs études et éditeur, dans la Bibliothèque de la Pléiade, des *Spectacles curieux d'aujourd'hui et d'autrefois – Contes chinois des Ming*.

HO Ping-ti, *The Ladder of Success in Imperial China : Aspects of Social Mobility*, John Wiley & Sons, New York, 1962.

François JULIEN, «Aux origines d'une valorisation possible du statut de l'intellectuel face au pouvoir : la relation du lettré et du prince selon Mencius», in *Extrême-Orient Extrême-Occident*, 4, pp. 11-26, 1984.

Andrew LO, «Four Examination Essays of the Ming Dynasty», in *Renditions*, n° 33-34, pp. 167-181, 1990.

I. MIYAZAKI, *China's Examination Hell : The Civil Service Examination of Imperial China*, Yale University Press, New Haven, 1981.

TENG Ssu-yu, «Chinese Influence on the Western Examination System», in *Harvard Journal of Asiatic Studies*, vol. VII, n° 1, pp. 267-312.

Père Étienne ZI,sj, *Pratique des examens littéraires en Chine*, 1894. Variétés sinologiques, n° 5, repr. Taipei, Ch'eng wen Publishing Company, 1971.

Père Étienne ZI,sj, *Pratique des examens militaires en Chine*,1896. Variétés sinologiques, n° 9, repr. Taipei, Ch'eng wen Publishing Company, 1971.

WOU King-tseu [Wu Jingzi] (1701-1754), *Chronique indiscrète des mandarins*, roman traduit du chinois et présenté par Tchang Fou-jouei, 2 vol., Paris, Gallimard, «Connaissance de l'Orient», 1976.

Les télescopes gravitationnels

FRANÇOISE COMBES • TOMMY WIKLIND

Les masses situées entre les sources de lumière célestes et la Terre courbent la lumière. Les images déformées des sources nous renseignent sur leur éloignement et sur la structure de l'Univers.

De toutes les informations qui parviennent à la Terre, la lumière est la plus étudiée : les rayonnements électromagnétiques sont enregistrés à l'aide de milliers de télescopes, au sol ou embarqués. Analysée, la lumière nous renseigne sur la genèse des étoiles, des galaxies et autres objets de l'Univers. Pourtant, dans un milieu hétérogène, la lumière ne se propage pas en ligne droite, de sorte que la vision que nous avons de l'Univers est déformée.

À la manière d'une lentille qui courbe les rayons lumineux, la matière dévie la lumière des astres éloignés ; de même, les régions contenant moins de matière que le reste de l'Univers déforment l'image des astres qui sont derrière elles. Ces déviations engendrent des mirages gravitationnels.

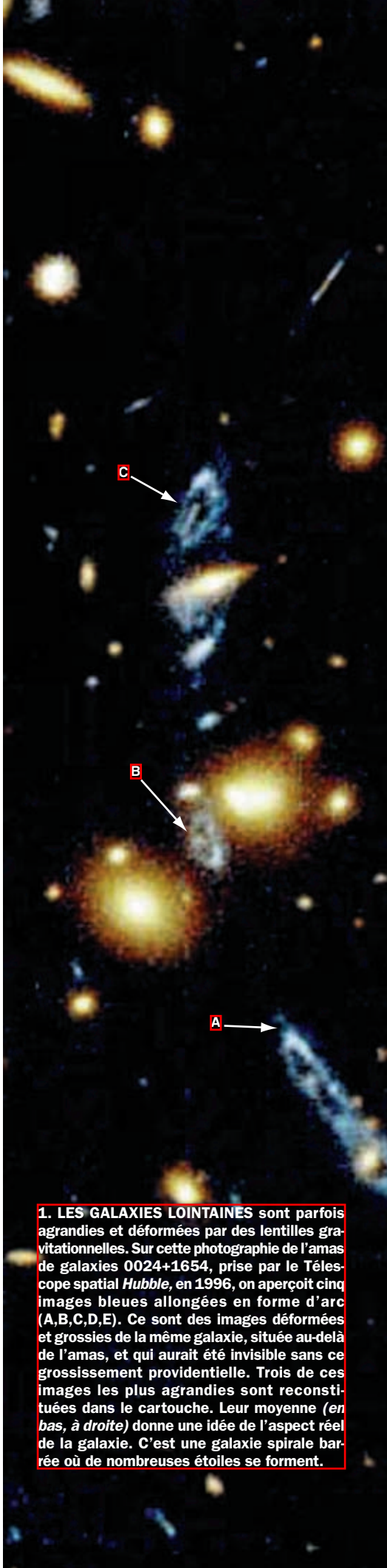
Dès 1704, Isaac Newton avait calculé la déviation des rayons lumineux par le Soleil, mais il avait prédit une valeur deux fois inférieure à celle qu'Albert Einstein détermina, en 1915, dans le cadre de sa théorie de la gravitation. La prévision d'Einstein fut confirmée en 1919 lors d'une éclipse de Soleil : Arthur Eddington et ses collègues mesurèrent une déflexion des rayons lumineux rasant le bord du Soleil de 1,75 seconde d'angle.

Si, le plus souvent, la lumière est peu déviée, de sorte que la position des astres sur le ciel indique leur position réelle, certaines configurations engendrent de fortes déformations. Comment verrait-on une galaxie spirale si une masse ponctuelle importante se trouvait entre nous et elle ?

Les rayons lumineux émis par la galaxie sont d'autant plus déviés que l'objet interposé est massif. L'observateur voit alors des images de la galaxie dans le prolongement des rayons lumineux qui l'atteignent, et non dans la direction réelle de la galaxie.

Bien que l'existence de mirages gravitationnels ait été prévue par les théoriciens dès les années 1960, notamment par Sjur Refsdal, de l'Université de Hambourg, les astronomes se sont peu préoccupés du phénomène jusqu'à la découverte, en 1979, du quasar 0957+561, le premier mirage gravitationnel (voir *Un mirage gravitationnel*, par Frederic Chaffee, *Pour la Science*, janvier 1981). Les quasars sont les objets les plus lumineux et les plus distants de l'Univers. Les astronomes américains auteurs de la découverte en avaient observé deux à moins de six secondes d'angle (un cinquième du diamètre lunaire), et avec un rayonnement caractéristique identique. Les quasars étant des objets rares – on en connaît quelques milliers seulement, alors qu'on a observé des millions de galaxies –, la probabilité de trouver deux quasars aussi proches dans le ciel était déjà très faible ; la probabilité d'en trouver deux avec un rayonnement identique était quasi nulle.

Les astronomes conclurent que les deux images provenaient du même



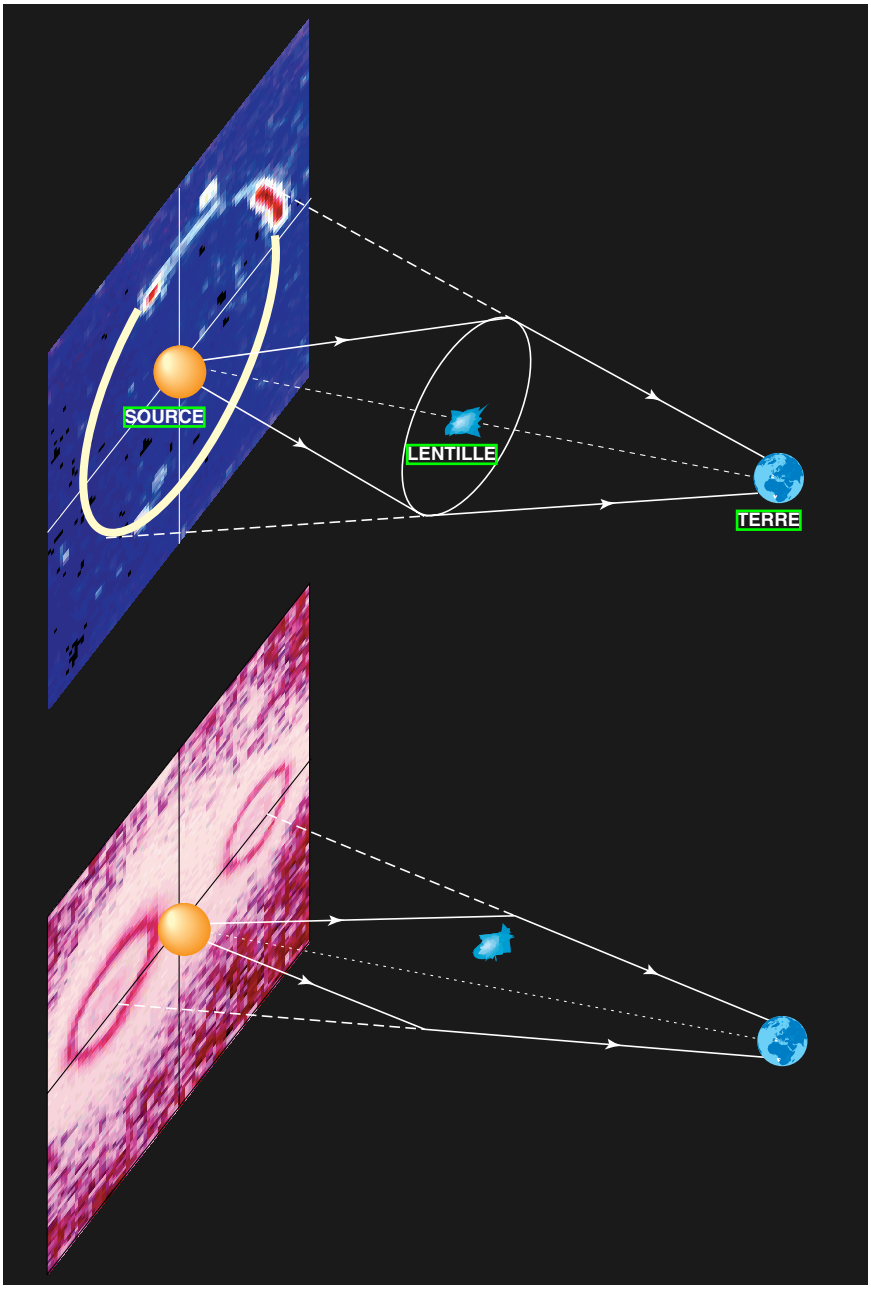
1. LES GALAXIES LOINTAINES sont parfois agrandies et déformées par des lentilles gravitationnelles. Sur cette photographie de l'amas de galaxies 0024+1654, prise par le Télescope spatial *Hubble*, en 1996, on aperçoit cinq images bleues allongées en forme d'arc (A,B,C,D,E). Ce sont des images déformées et grossies de la même galaxie, située au-delà de l'amas, et qui aurait été invisible sans ce grossissement providentielle. Trois de ces images les plus agrandies sont reconstituées dans le cartouche. Leur moyenne *(en bas, à droite)* donne une idée de l'aspect réel de la galaxie. C'est une galaxie spirale barrée où de nombreuses étoiles se forment.

NASA, W. Keel et E. Turner (Princeton University), J. Tyson (Bell Laboratories)

A
C
D
1''
(ACD)1/3
D
E

quasar dont les rayons lumineux avaient été déviés par une galaxie ou par un groupe de galaxies situés dans la même direction. L'évolution de l'intensité lumineuse des deux images confirma cette hypothèse : les deux images évoluaient conjointement avec un délai fixe. En effet, le trajet des photons, et donc, le temps mis par la lumière pour nous parvenir, diffère pour chacune des images. Lorsque l'intensité du quasar varie avec, en particulier, des sursauts d'intensité, le sursaut détecté d'abord sur une image est détecté après un délai fixe sur l'autre image.

Voici dix ans, on connaissait 17 mirages gravitationnels ; aujourd'hui, on en a identifié 34, par leur rayonnement visible ou radio ; une dizaine d'arcs dans les amas de galaxies pourraient également s'ajouter à ce total. D'abord considérées comme des curiosités célestes, les lentilles gravitationnelles sont devenues des outils qui nous renseignent sur les galaxies lointaines, sur la répartition de matière dans l'Univers et, aussi, sur les caractéristiques du gaz qui forme les lentilles : lorsque la lumière d'une galaxie traverse du gaz, celui-ci absorbe une partie de la lumière, de sorte que le spectre enregistré présente des raies d'absorption. Ces dernières, révèlent la nature des molécules et atomes présents dans le milieu traversé. Nous verrons que les raies moléculaires observées dans les lentilles sont particulièrement utiles.



P.S. (J. Vanderriest) (J. Patnaik)

2. LES MIRAGES GRAVITATIONNELS se forment lorsque la lumière d'une source lointaine est déviée par une lentille. Ainsi, on observe des images, non dans la direction réelle de la source, mais dans le prolongement des rayons lumineux qui arrivent sur Terre. Quand l'observateur, la lentille et la source sont parfaitement alignés, l'observateur voit un anneau *(en haut)*. En revanche, un décalage de la lentille provoque la formation de plusieurs images de la même source *(voir la figure 4)*.

Objets lointains et matière noire

Comme les lentilles optiques, les lentilles gravitationnelles focalisent la lumière. La taille des objets est agrandie, alors que leur luminosité totale reste inchangée. Puisque la probabilité de trouver des objets massifs dans une direction augmente avec la distance, les astres lointains ont le plus de chance d'être agrandis.

Grâce à ces télescopes gravitationnels, des quasars lointains apparaissent sous la forme d'images multiples *(voir la figure 2)*, ou accompagnés d'anneaux d'Einstein, obtenus lorsque l'astre se trouve exactement aligné avec la lentille sur la ligne de visée. Comme l'alignement parfait est très rare, les anneaux sont déformés ou incomplets *(voir la figure 4)*.

Même des galaxies ordinaires peuvent être détectées à de grandes distances, lorsqu'elles se trouvent derrière un amas de galaxies *(voir la figure 1)* : leur image agrandie devient perceptible. Grâce à ces études, les astronomes espèrent mieux connaître les galaxies lointaines et comprendre leur évolution.

Comment les mirage gravitationnels nous renseignent-ils sur les caractéristiques des lentilles, tout d'abord ? Les mirages résultent d'interactions des rayons lumineux avec le champ gravitationnel de la lentille. Selon la fameuse loi d'Einstein, $E = mc^2$ (où E est l'énergie, m, la masse, et c, la vitesse de la lumière), la masse et l'énergie sont équivalentes. Ainsi, la lumière, transmise par des particules sans masse mais dotées d'une énergie (les photons), est, comme une particule massive, soumise à l'attraction universelle : elle est attirée par le champ gravitationnel de la lentille massive.

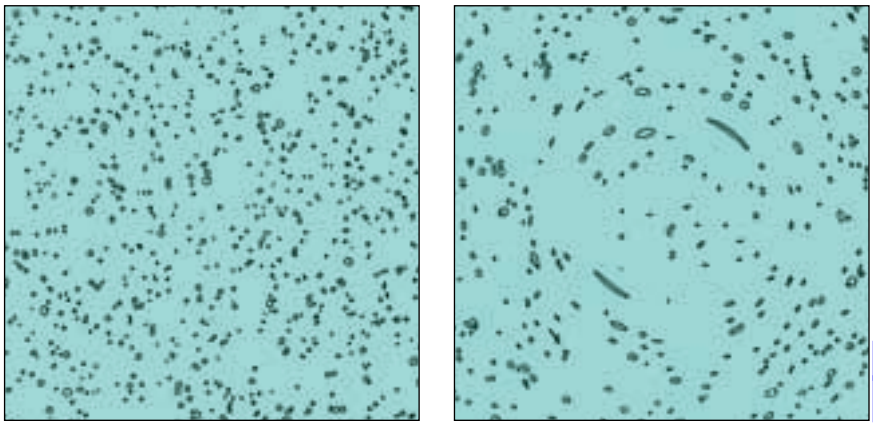
Or, le champ gravitationnel de la lentille dépend de la répartition de la masse dans l'espace. Ainsi, en analysant un mirage gravitationnel, on calcule la

masse de la lentille. Lorsque la lentille est un amas de galaxies dont on peut mesurer la luminosité, on déduit la masse de la matière qui ne brille pas, autrement dit, la matière noire. Cette matière noire constituerait une grande partie de la masse de l'Univers, et sa détection est l'une des principales applications des lentilles gravitationnelles.

Les galaxies lointaines, très nombreuses, forment une image aléatoire que la présence d'un lentille déforme de façon caractéristique *(voir la figure 3)*. Utilisant ce phénomène, Bernard Fort, de l'Observatoire de Paris, Yannick Mellier, de l'Institut d'astrophysique de Paris, et leurs collègues, ont détecté de multiples arcs lumineux dans plusieurs amas, dont Abell 370 et Abell 2218. Ces arcs correspondent à des galaxies situées derrière les amas. Ayant calculé la masse des différentes zones des amas, ils ont montré que la matière noire était cinq fois plus concentrée dans les régions centrales des amas que dans leur périphérie. Ce résultat est inattendu, car la matière lumineuse est répartie de manière uniforme dans les amas. Cette différence de concentration dénoterait une différence dans la genèse de la matière lumineuse et de la matière noire.

Pour mieux étudier la matière noire, deux approches complémentaires sont poursuivies. Une partie de la matière noire est constituée de matière ordinaire, telles les naines brunes. Ces petites étoiles ne brillent pas, mais les astronomes les décèlent indirectement par leurs effets de microlentille gravitationnelle : les naines brunes dévient la lumière des étoiles situées dans leur direction, derrière elles, de sorte que l'on peut voir, en cas d'alignement, un petit mirage gravitationnel. À ce jour, les expériences MACHOS et EROS, consacrées à ces études, ont détecté quelques naines brunes dans le Grand Nuage de Magellan, l'une des galaxies les plus proches de la nôtre.

L'autre approche, pour la détection de la matière noire qui n'est pas constituée de matière ordinaire, mais de particules exotiques, utilise la déformation à toutes les échelles : outre les arcs lumineux, relativement faciles à détecter et qui sont le fruit d'une déformation par la matière dense, il existe à très grande échelle dans l'Univers des multitudes de distorsions des images de galaxies, non plus par un seul amas, mais par toute la masse dispersée dans l'Univers. La détection des déformations à grande échelle indique la position des grandes structures de l'Univers, y compris la matière noire. Par comparaison avec les prévisions des modèles cosmologiques, on détermine la géométrie de l'Univers et les paramètres cosmologiques, comme la densité moyenne de l'Univers et sa courbure.



3. DEFORMATION DE GALAXIES LOINTAINES, dû à une lentille gravitationnelle. A gauche, on a indiqué la multitude de galaxies que l'on verrait sans lentille. L'interposition d'un amas de galaxies jouant le rôle de lentille *(au centre de l'image)* déforme l'image des galaxies d'autant plus qu'elles sont près de la direction de la lentille *(à droite)*.

Malheureusement, la mesure de ces faibles déformations est malaisée, car les galaxies ont des orientations variées : il est difficile de distinguer les galaxies qui sont allongées en raison des déformations de mirage gravitationnel, d'une part, des galaxies vues par la tranche non déformées, d'autre part. Toutefois, les lentilles produisent des images symétriques qui facilitent la distinction : en l'absence de déformations, l'orientation des galaxies est aléatoire, tandis que, sur de grandes échelles, l'alignement des galaxies déformées est caractéristique.

Grâce aux perfectionnements des détecteurs et des méthodes d'analyse, les astronomes ont décelé des distorsions de quelques pour cent sur de grandes échelles. De nombreux programmes d'observation sont en cours sur les grands télescopes. En particulier, le groupe de Y. Mellier et B. Fort espère, grâce à une analyse statistique de vastes régions du ciel, y connaître la répartition de matière totale.

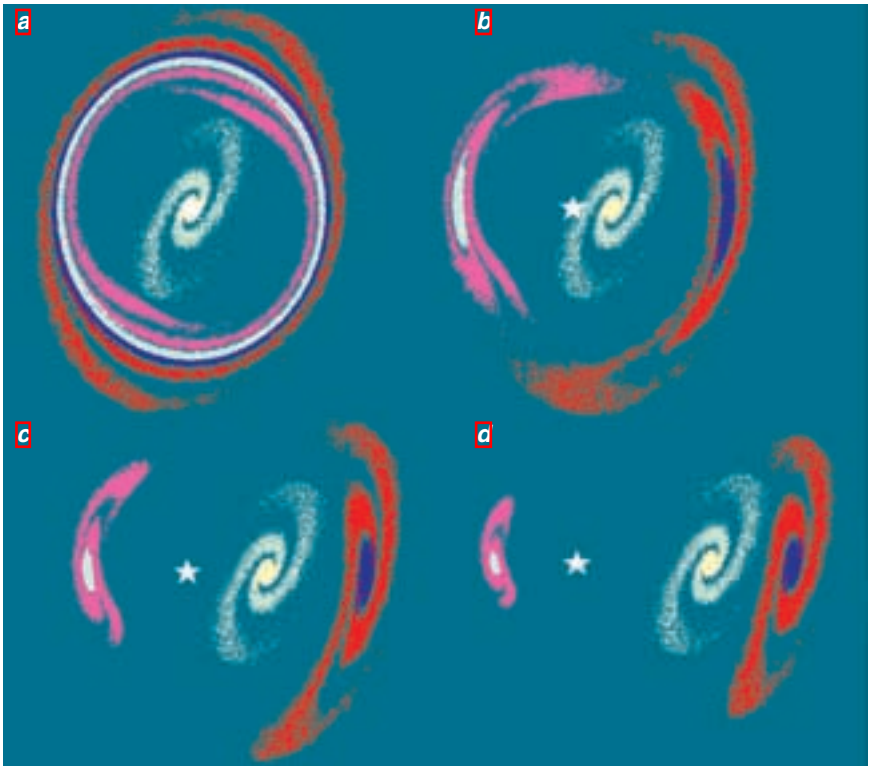
La géométrie de l'Univers

Outre la mesure de la répartition de la matière, les lentilles gravitationnelles aident aussi à connaître les paramètres fondamentaux de la cosmologie. Selon la théorie du Big Bang, l'Univers est en expansion continuelle depuis 15 milliards d'années. Comme les taches sur un ballon que l'on gonfle, les galaxies s'éloignent d'autant plus vite les unes des autres (et de nous) qu'elles sont lointaines. Le quotient de leur vitesse par leur distance est nommé constante de Hubble, du nom de l'astronome américain Edwin Hubble (1889-1953) qui, dans les années 1920, a mis en évidence cette fuite des galaxies. La constante de Hubble, ainsi que le paramètre de décélération (qui indique les variations de la vitesse d'éloignement des galaxies en fonction du temps) sont des paramètres mesurables par l'étude des lentilles gravitationnelles.

Pour étudier une galaxie, on sépare les différentes longueurs d'onde qui composent la lumière qu'elle émet. En raison de l'effet Doppler, le spectre ainsi mesuré est d'autant plus décalé vers les grandes longueurs d'onde, «vers le rouge», que la galaxie étudiée s'éloigne rapidement (comme la sirène d'une ambulance qui s'éloigne est plus grave que lorsque la sirène s'approche). Comme les galaxies les plus éloignées sont celles qui s'éloignent le plus vite, le décalage vers le rouge d'un objet céleste révèle sa distance. La lumière se déplaçant à vitesse finie, c'est également une mesure de son âge : les objets ayant le plus grand décalage vers le rouge sont aussi les plus jeunes.

La constante de Hubble reste mal connue, en particulier, parce qu'on ne connaît la distance absolue des objets lointains qu'à un facteur deux près. Comment mesurer le plus précisément possible la distance d'objets lointains ?

Tel l'arpenteur, l'astronome reporte son «mètre-étalon» jusqu'aux lointaines galaxies. Pour cela, il procède par étape. La distance des étoiles les plus proches (moins de 900 années-lumière) est déterminée géométriquement par la méthode des parallaxes (la variation de direction



P. Kornprobst

4. SELON L'ALIGNEMENT DE LA SOURCE ET DE LA LENTILLE, l'aspect des mirages diffère. Dans cette simulation, la lentille, ponctuelle, est représentée par l'étoile blanche. La source est une galaxie qui, en l'absence de lentille, serait observée non déformée à l'emplacement de la galaxie verte. En haut à gauche (*a*), la source est alignée avec la lentille : la galaxie source est déformée en anneaux d'Einstein. À mesure que la source s'éloigne de la lentille, la galaxie source est moins déformée (*b*, *c*, *d*).

apparente d'une étoile à six mois d'intervalle, c'est-à-dire quand la Terre s'est déplacée d'un demi-tour sur son orbite). Plus loin, on utilise des étoiles variables périodiques nommées Céphéides dont la luminosité absolue est connue : en 1912, l'astronome américaine Henrietta Leavitt a montré que la luminosité absolue d'une Céphéide est uniquement fonction de sa période. Ainsi, en mesurant la période et la luminosité d'une Céphéide, on en déduit sa distance : elle est proportionnelle au quotient de sa luminosité absolue par sa luminosité apparente.

Cette méthode, dite des «chandelles standards», s'applique également aux distances intergalactiques : les astronomes utilisent alors les galaxies les plus brillantes des amas, dont la luminosité absolue est connue comme standard. Pour les distances les plus lointaines, on utilise la loi de l'expansion de l'Univers et l'on déduit la distance d'un objet en fonction de sa vitesse apparente par rapport à nous (mesurée par son décalage vers le rouge).

Pour cela, il faut que la vitesse d'expansion soit suffisamment grande devant les vitesses particulières des galaxies entre elles. Ces vitesses, qui s'ajoutent au mouvement général de l'expansion, sont dues à l'attraction gravitationnelle des amas de galaxies les plus proches, l'Univers n'étant pas homogène à cette échelle. Dans notre voisinage, par exemple, les galaxies ont toutes un mouvement important vers un amas de galaxies nommé le Grand Attracteur.

Comment détermine-t-on la constante de Hubble? C'est le quotient de la vitesse d'éloignement des galaxies par leur distance. Pour la calculer, il faut donc connaître le mieux possible la distance d'une galaxie et sa vitesse d'éloignement due à l'expansion. Cette constante est déterminée aux distances intermédiaires, où la méthode des «chandelles standards» est applicable, à condition de soustraire les vitesses propres.

Toutefois, les astronomes ne s'accordent ni sur la distance des galaxies dans cette région intermédiaire, ni sur leur vitesses particulières : la constante de Hubble reste incertaine, avec une valeur comprise entre 40 et 100 kilomètres par seconde et par mégaparsec (un parsec est égal à 3,28 années-lumière). Les désaccords portent surtout sur les diverses manières de corriger les vitesses particulières. Une nouvelle méthode pour évaluer les distances très lointaines est la bienvenue, car, à ces distances, les vitesses propres sont négligeables par rapport à la vitesse d'expansion : avec la seule distance, on détermine la constante de Hubble.

Cette méthode recherchée est celle des lentilles gravitationnelles, parce que la lumière des différentes images parcourt des trajets de longueurs différentes (sauf les cas de l'anneau d'Einstein, où par symétrie, tous les parcours ont la même longueur). Supposons que l'on observe une image double d'un quasar et nommons d_1 et d_2 les longueurs des deux trajets de la lumière. Par l'analyse de la position relative des images du quasar et de la lentille, et par une modélisation de la lentille, on détermine le quotient entre les longueurs des trajets suivis par les deux images, soit d_1/d_2. Dans le cas d'une lentille ponctuelle, ce quotient des trajets dépend uniquement de la distance angulaire entre la lentille et les deux images de la source. Pour connaître les longueurs elles-mêmes, et non seulement leur quotient, une information supplémentaire est nécessaire.

Si l'on mesure la différence de temps entre le moment où un sursaut de luminosité apparaît sur une image et celui où ce même sursaut apparaît sur l'autre image, on en déduit la différence de longueur entre les chemins optiques : c'est le produit de la différence de temps par la vitesse de la lumière. Connaissant le quotient (d_1/d_2) et la différence entre les longueurs $(d_1 - d_2)$, on déduit ces longueurs d_1 et d_2, qui sont égales à la distance absolue du quasar à quelques pour cent près.

Du premier mirage gravitationnel découvert, QSO 0957+561, les astronomes auraient pu théoriquement déduire une distance précise, mais, la comparaison des courbes de lumière (la variation d'éclat en fonction du temps) des deux images est délicate. Ainsi, selon les déterminations, la différence de temps d'arrivée est comprise entre 404 jours et 537 jours.

De surcroît, l'estimation du quotient des trajets dépend de la modélisation de la lentille, l'objet déflecteur de la lumière. Or, pour ce quasar, la séparation entre les deux images est grande (six secondes d'angle). La masse nécessaire à une telle déviation est celle d'un petit amas de galaxies, que l'on observe

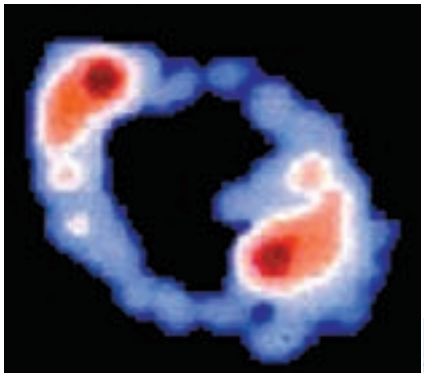
d'ailleurs devant le quasar. La répartition de la masse dans un amas de galaxies étant plus difficile à estimer que dans une seule galaxie, le quotient des trajets est moins précisément connu. La constante de Hubble déduite est ainsi comprise entre 33 et 117 kilomètres par seconde et par mégaparsec, ce qui est trop approximatif pour préciser la valeur déterminée par les méthodes classiques d'estimation de la distance absolue des objets lointains.

Ne pourrait-on trouver une source dont l'image serait déviée par une seule galaxie, de sorte que la modélisation soit plus facile ? L'idéal serait que la galaxie soit la plus massive possible, pour que la séparation angulaire des multiples images de la source soit voisine de une seconde d'angle. Dans ce cas, on pourrait séparer les images dans le domaine visible et, comme le retard est plus court (plus la séparation angulaire est faible, moins la lumière est déviée et plus le retard est court) que dans le cas précédent, on associerait facilement les caractéristiques communes dans le spectre de chaque image. Dans le visible, aucune lentille possédant ces caractéristiques n'a encore été observée, mais peut-on en trouver à d'autres longueurs d'onde ?

Les mirages radio

Contrairement au domaine visible, la résolution angulaire dans le domaine radio n'est pas dégradée par la turbulence atmosphérique. De plus, l'obscurcissement dû à la lentille elle-même est plus faible que dans le visible : lorsque les images sont très rapprochées, les rayons lumineux déviés traversent la lentille près du centre, où l'absorption par le gaz et la poussière de la lentille est importante. Une ou plusieurs images du quasar peuvent alors être complètement absorbées dans le visible et n'être aperçues qu'en radio.

La source radio PKS 1830-211 est un cas exemplaire. C'est un quasar découvert aux longueurs d'onde centimétriques par deux astronomes indiens, Ravi Subramanyan et Ramesh Rao, de l'Université de Pune, avec les antennes interférométriques du VLA (*Very Large Array*, ou «très grand réseau»), au Nouveau Mexique. La résolution atteinte par cet instrument est bien meilleure que la seconde d'angle. La carte de l'émission radio centimétrique révèle deux images gravitationnelles du quasar, avec un



5. DEUX IMAGES DE LA SOURCE et un embryon d'anneau d'Einstein sont visibles sur ce mirage gravitationnel du quasar PKS 1830-211. Cette image radio a été obtenue aux antennes interférométriques du VLA, au Nouveau Mexique.

embryon d'anneau d'Einstein *(voir la figure 5)*. Aucune contrepartie dans le visible n'a été trouvée, ni pour le quasar ni pour la lentille, et la recherche de raies à une longueur d'onde de 21 centimètres, qui révèlent l'hydrogène de la lentille, est longtemps restée infructueuse, en raison d'interférences de télécommunications terrestres. Cette raie vient juste d'être détectée au VLA par Chris Carilli, de l'Observatoire de Socorro, mais elle est difficilement exploitable.

Pour étudier cette lentille, nous avons recherché les molécules qui pourraient se trouver dans la lentille et absorber la lumière du quasar à des longueurs d'onde caractéristiques. Nous avons balayé le domaine de longueurs d'onde à deux et trois millimètres avec le télescope submillimétrique de 15 mètres de diamètre du SEST (*Swedish-European Submillimeter Telescope*, soit «télescope suédo-européen submillimétrique»), à La Silla, au Chili. Grâce à cette exploration, nous avons découvert une dizaine de raies d'absorption moléculaires. Comment mesurer le décalage vers le rouge de ces raies ?

La position des raies est connue en laboratoire mais elles sont nombreuses. L'identification des molécules absorbantes n'a été possible qu'après l'observation d'un certain nombre de raies. Les raies détectées sont celles de nombreuses molécules organiques : le monoxyde de carbone (CO), le cyanure d'hydrogène (HCN), le sulfure de carbone (CS), etc. Pour chaque molécule, plusieurs raies sont aujourd'hui détectées. Le décalage vers le rouge de la lentille, mesuré grâce à l'identification des raies, est de 0,88582.

Dans nos premières observations, les deux images étaient superposées. À l'aide de l'interféromètre de l'IRAM, près de Grenoble, nous sommes parvenus à séparer les deux images, distantes d'une seconde d'angle. Nous avons ainsi montré que seule la lumière d'une des images du quasar était absorbée par les molécules identifiées.

À l'aide de cette absorption sélective, nous pouvons mesurer l'intensité lumineuse de chaque image, sans même séparer spatialement le système double. Nommons A et B les deux images. Sans absorption, les émissions continues des deux images s'ajoutent : on observe A + B. En revanche, lorsque l'on observe à la longueur d'onde d'une raie d'absorption (par exemple CO), seule l'image B est absorbée ; il ne reste plus que l'émission continue de A. En mesurant simultanément l'intensité lumineuse à la longueur d'onde d'une raie et à une autre longueur d'onde, on en déduit donc l'intensité de A et celle de B. En répétant cette mesure à des moments successifs, on peut alors estimer la différence des chemins optiques entre les deux images. La différence des temps d'arrivée des photons devrait être de trois à sept semaines. Ces observations sont actuellement effectuées de façon hebdomadaire avec les télescopes de l'IRAM et du SEST.

Une autre source radio, B0218+357, ressemble beaucoup à PKS 1830-211 : c'est un quasar qui nous apparaît double, avec un superbe anneau d'Einstein *(voir la figure 6)*. La disposition des deux images A et B est caractéristique de la géométrie attendue des lentilles gravitationnelles. Le centre de l'anneau indique la direction du centre de la lentille. La plus faible des images, B, est à l'intérieur de l'anneau. Les sources radio comportent en général une source compacte, dont le spectre est plat (l'intensité ne varie pas avec la fréquence), et des jets radio avec des condensations brillantes de spectre en pente (l'intensité de la lumière reçue diminue avec la fréquence). Ici les images A et B ont des spectres plats, alors que l'anneau a un spectre en pente. Ainsi, l'anneau est probablement l'image d'une condensation brillante dans un jet du quasar, alignée exactement avec la lentille et l'observateur.

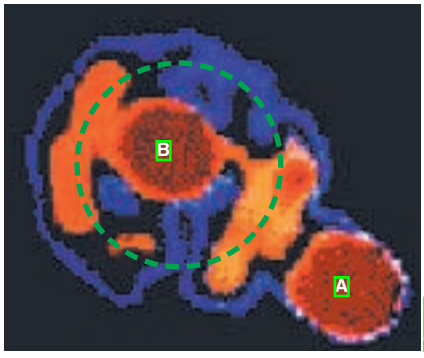
Dans le domaine visible, on voit uniquement l'image B, l'autre image étant sans doute très obscurcie par de la poussière. En effet, la lentille est une

galaxie vue par la tranche, située entre le quasar et notre Galaxie. Sur la ligne de visée correspondant aux rayons lumineux donnant l'image A se trouvent des nuages interstellaires très denses, détectés grâce à leurs raies d'absorption dans le domaine radio. La raie de l'hydrogène atomique a été observée par C. Carilli et ses collègues en 1993, et nous avons détecté plus d'une douzaine de raies d'absorption moléculaires avec le télescope de 30 mètres de l'IRAM, au Pico Veleta, en Espagne.

La distance angulaire entre les deux images A et B est de 0,3 seconde d'angle : c'est la plus faible détectée à ce jour. La déviation des rayons lumineux n'est due qu'au bulbe de la galaxie-lentille, et la modélisation géométrique du phénomène est particulièrement simple. En utilisant, dans le domaine radio, la variation de polarisation successive (la direction d'oscillation de l'onde lumineuse) des deux images, Edward Corbett et ses collègues, de l'Université d'Hertfordshire, ont déterminé la différence des temps d'arrivée des photons : les photons de l'image A mettent 12 ± 3 jours de plus à nous parvenir que ceux de l'image B, de sorte que la constante de Hubble serait égale à quelque 30 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Cette valeur dépend toutefois du modèle géométrique de lentille. La confirmation à d'autres longueurs d'onde est impatiemment attendue.

Raies moléculaires et gaz lointain

La détection de raies d'absorption dans le spectre des quasars n'est pas nouvelle : la raie d'absorption de l'hydrogène atomique Lyman-alpha, dans l'ultraviolet, est si fréquemment observée que l'on nomme la série de raies détectées la «forêt» Lyman-alpha. Il suffit de si peu d'hydrogène sur la ligne de visée entre un quasar et l'observateur, pour produire une raie détectable, que la masse d'hydrogène interposé n'est pas suffisante pour créer une lentille. En étudiant ces raies, on s'est aperçu que les galaxies sont entourées de filaments d'hydrogène, sur des distances égales à plus de dix fois leur diamètre. Les galaxies sont comme les nœuds d'une toile de filaments emplissant tout l'Univers. Ce gaz intergalactique, beaucoup plus abondant par le passé, a servi à former les étoiles des galaxies durant leur évolution.



A. Patnak

6. LE QUASAR RADIO B0218+357. Grâce à la résolution de 50 milliseconde d'angle, on distingue les deux images du quasar A et B (séparées de 0,3 seconde d'angle) ainsi qu'un embryon d'anneau d'Einstein.

Si les raies d'absorption de l'hydrogène atomique permettent l'exploration du gaz diffus, les raies moléculaires, observables dans le cas de mirages gravitationnels, sont l'outil privilégié pour explorer l'Univers dans ses lignes de visée les plus opaques. La densité de ce gaz augmente au voisinage des galaxies ; l'hydrogène absorbe tant les rayonnements ultraviolets et visibles qu'il bloque la lumière à ces longueurs d'onde. Aussi, on complète les observations en étudiant des raies qui ne sont pas totalement absorbées, telle la raie de l'hydrogène atomique à 21 centimètres, ou, pour du gaz plus dense encore, les raies moléculaires. Dans ce cas, la quantité de lumière absorbée est proportionnelle à la quantité de gaz sur la ligne de visée.

Les raies d'absorption moléculaires dues au gaz situé devant les quasars se révèlent également très utiles pour l'étude des nuages moléculaires froids à grand décalage vers le rouge. La technique des raies d'absorption est très sensible : à des décalages vers le rouge élevé, on peut détecter des quantités de gaz de quelques masses solaires (un seul nuage). Cette grande sensibilité a permis l'étude chimique des nuages, par la détection de dizaines de raies moléculaires correspondant à plusieurs molécules organiques et de leurs isotopes (des molécules dont les atomes diffèrent par leur nombre de neutrons).

Dans le milieu interstellaire, les proportions de molécules aussi fondamentales que l'oxygène moléculaire ou l'eau ne sont toujours pas déterminées. Le gaz très éloigné absorbe le rayonnement à des longueurs d'onde très décalées vers le rouge, de sorte que la longueur d'onde des raies d'absorption de ces molécules est supérieure à ce qu'elle est dans notre Galaxie. Ainsi, on s'affranchit de l'absorption atmosphérique et nous avons montré qu'en direction de B0218+357, la proportion d'oxygène moléculaire par rapport au monoxyde de carbone était inférieure aux prédictions des modèles chimiques.

Quelle est la température du gaz détecté à ces distances? Au minimum, elle est égale à 2,76 kelvins, la température du fond diffus cosmologique, vestige de l'époque reculée de la recombinaison, lorsque les électrons et les protons qui, jusqu'alors, étaient libres, se sont regroupés en atomes. Dans un gaz diffus, les molécules ne peuvent pas être excitées par collision avec des molécules d'hydrogène : leur température est celle du fond diffus cosmologique avec lequel elles sont en équilibre radiatif. On estime ainsi la température du fond diffus cosmologique et sa variation en fonction du décalage vers le rouge. Les déterminations que nous avons faites à un décalage vers le rouge de 0,9, corroborent les prédictions de la théorie du Big Bang : la température du fond diffus était supérieure par le passé, conformément à la théorie.

L'observation des raies d'absorption moléculaires dans les lentilles gravitationnelles est une technique pleine de promesses pour sonder le gaz froid à grand décalage vers le rouge. Les futurs instruments millimétriques bénéficieront de plus grandes surfaces collectrices, et un nombre bien supérieur de sources deviendront accessibles, car le nombre de sources croît très rapidement lorsque le flux décroît. Les lentilles gravitationnelles deviendront des outils fondamentaux de l'astrophysique du XXIe siècle.

Françoise COMBES est astronome à l'Observatoire de Paris. Tommy WIKLIND est astronome à l'Observatoire spatial d'Onsala, en Suède.

T. WIKLIND et F. COMBES, *The Redshift of the Gravitationnal Lens of PKS1830-211 Determined from Molecular Absorption lines*, in *Nature*, vol.379, pp.139-141, 11 janvier 1996.

F. COMBES et T. WIKLIND, *Direct Search for Molecular Oxygen towards the Gravitationonal Lens B0218+357*, in *Astronomy & Astrophysics*, vol.303, p.L61, 1995.

B. FORT et Y. MELLIER, *Arcs in Clusters of Galaxies*, in *Astronomy and Astrophysics Review*, vol. 5, p 239, 1994.

E. TURNER, *Les lentilles gravitationnelles*, in *Pour la Science*, septembre 1988.

La richesse des provinces de l'Empire aztèque

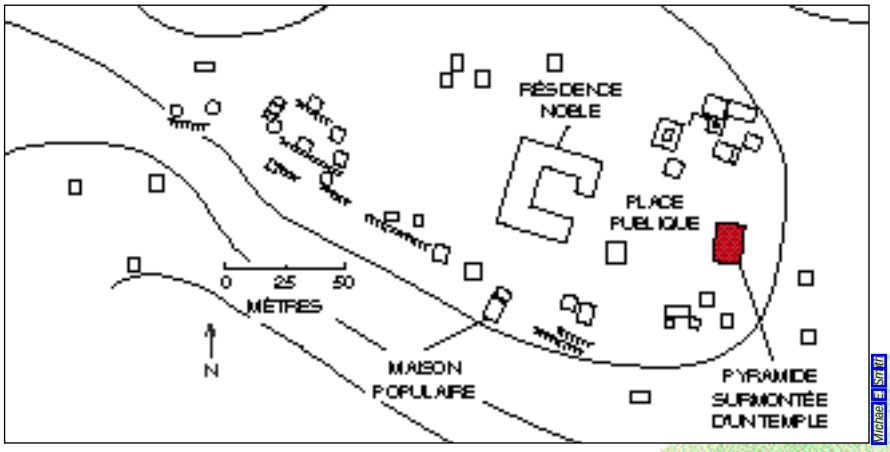
MICHAEL SMITH

La population aztèque produisait des étoffes qu'elle échangeait contre des marchandises importées d'autres régions et de l'extérieur de l'empire.

En 1519, lorsque Hernán Cortés et son armée entrent dans Tenochtitlán (l'actuel Mexico), l'empereur Moctezuma règne au sommet d'une pyramide sociale et politique, dont l'organisation transparaît dans la comptabilité impériale : quatre fois par an, les rois des cités-États versent un tribut à l'empereur qui, en échange, leur délègue localement ses pouvoirs. Les nobles des provinces, à leur tour, dépendent du roi de leur cité-État et, tout en bas de la hiérarchie, le peuple produit toutes sortes de biens et verse un tribut qui fait vivre toute la noblesse. Les impôts qui pèsent sur les gens du commun sont donc lourds. Comment ces derniers vivent-ils ?

Grâce à des prospections systématiques menées dans les années 1970 dans la vallée de Mexico, nous savons que la population de l'Empire aztèque augmente fortement à partir de 1350 : dans cette seule région, la population passe de 175 000 à près d'un million d'habitants, qui se partagent la charge de nourrir la noblesse.

Cette explosion démographique s'accompagne de la construction de nouveaux villages et de nouvelles villes, et de la mise en culture de toutes les terres disponibles, souvent au prix d'un dur labeur : le paysage du Mexique central est largement transformé. Les paysans étendent les surfaces cultivables en aménageant des terrasses sur les flancs des collines ; ils développent l'irrigation en construisant des barrages et des canaux. Surtout, ils créent des champs artificiels, nommés *chinampas*, sur les lacs peu



1. LA PLACE DU MARCHÉ dans la ville de Cuexcomate, au XVe siècle, rassemble vendeurs, acheteurs et artisans. Les gens du peuple y échangent leur production artisanale domestique, principalement des textiles, contre du sel et des poteries décorées, importées de la vallée de Mexico et d'autres régions, contre des lames d'obsidienne en provenance de contrées situées à 100 kilomètres ou plus, et contre des aiguilles et d'autres objets en bronze de l'Ouest du Mexique. On y trouve aussi des produits locaux, tels des nattes rondes tissées, des paniers, des meules et des molettes pour broyer le maïs, et des plaques de cuisson pour les tortillas. Un plan des fouilles du centre de la ville de Cuexcomate *(à gauche)* indique l'emplacement de la pyramide qui supporte le temple principal, celui d'un groupe résidentiel noble et ceux des habitations populaires, ainsi que d'autres édifices, des champs en terrasses plus éloignés et des maisons rurales.

profonds du Sud de la vallée de Mexico, développant l'un des systèmes agricoles les plus productifs jamais inventés en agriculture prémoderne.

Quelles sont les conséquences de la croissance démographique, du prélèvement des tributs et de l'intensification de l'agriculture sur la vie du peuple aztèque ? Quelle est sa situation économique et comment évolue-t-elle ? La fouille de deux sites ruraux, Capilco et Cuexcomate, au Sud-Ouest de l'actuelle ville de Cuernavaca, et du site urbain de Yautepec, au Centre-Nord de l'État du Morelos, au Sud de la vallée de Mexico, a révélé que les Aztèques n'étaient pas une masse de pauvres paysans écrasés sous les tributs : les agriculteurs produisaient aussi des objets artisanaux et ils commerçaient, en dehors du contrôle impérial, échangeant leur production contre divers biens provenant d'autres régions, voire de l'extérieur de l'empire.

Des agglomérations rurales

Les vestiges que l'on découvre lors de la fouille des habitations fournissent beaucoup d'informations sur la vie sociale et économique des populations. À Capilco et à Cuexcomate,

Tomo Narasimha

2. LA MAISON DU PAYSAN AZTÈQUE était petite (15 à 25 mètres carrés) et n'avait probablement que deux portes et pas de fenêtres. Dans les cours, entre les maisons, on pratiquait de nombreuses activités, dont le tissage. Les maisons étaient «meublées» de nattes tressées et de paniers ; un petit autel domestique avec deux ou trois figurines et un encensoir avait la forme d'une simple niche dans un mur. L'absence de foyer à l'intérieur est assez étonnante : la cuisine était peut-être faite, comme c'est le cas dans les villages

nous avons facilement repéré où creuser : les traces des murs étaient visibles au sol. Capilco était un village de 21 maisons, et l'on dénombre plus de 150 structures à Cuexcomate, avec des temples, des entrepôts et des dépôts rituels. La plupart des maisons, construites en briques d'argile crue sur des fondations de pierre, avaient une surface moyenne de 15 mètres carrés. Des sondages dans 29 maisons et la fouille exhaustive de dix d'entre elles nous ont conduits à diviser la période aztèque tardive (1350-1519) en deux sous-périodes : la période aztèque tardive A, de 1350 à 1440, avant la conquête militaire de la région par l'Empire aztèque, et la période tardive B, de 1440 à 1519.

Capilco est fondé par quelques familles paysannes avant 1350. L'expansion démographique du site commence au cours de la période tardive A, où Cuexcomate est fondé à son tour et où les deux agglomérations se développent rapidement. Pour subvenir à leurs besoins, notamment alimentaires, les populations intensifient leur culture du maïs, du haricot et du coton : elles aménagent de nouvelles parcelles,

traditionnels actuels, dans un appentis adossé à l'arrière de la maison. Les photographies ci-contre présentent des objets exhumés, découverts dans des dépotoirs contigus aux habitations datant du XIIe au XVIe siècle, dans trois sites récemment fouillés dans l'État mexicain actuel du Morelos.

FONDATIONS

FIGURINES RITUELLES

MOULES DE FIGURINES

TESSONS DE POTERIE IMPORTEE

OBJETS EN BRONZE

Michael E. Smith

OUTILS EN CERAMIQUE POUR TISSER LE COTON

Les Tarasques, voisins et concurrents des Aztèques

À deux reprises au moins, en 1479-1480 et en 1515, les Aztèques tentèrent de prendre le contrôle d'un royaume situé sur les marges occidentales de leur propre empire et dominé par une population que l'on désigne, depuis la conquête espagnole, sous le nom de «tarasque». Dans les deux cas l'entreprise se solda par un cuisant échec, avec perte, dit-on, de plusieurs dizaines de milliers de guerriers. Qui étaient donc ces redoutables Tarasques qui firent mieux que repousser les assauts des Aztèques?

Le royaume qu'ils avaient constitué était de taille assez modeste (environ 80 000 kilomètres carrés) et correspondait *grosso modo* à l'État actuel du Michoacan. Son organisation et son unification étaient alors fort récentes. Quant à la langue tarasque, fait intrigant, elle n'appartient à aucune des familles dans lesquelles les linguistes classent les différentes langues de l'ancien Mexique.

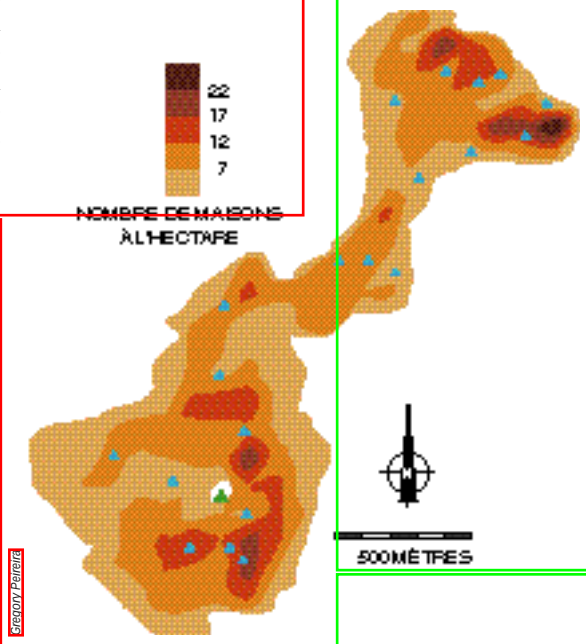
Pour reconstituer les étapes de l'évolution qui s'est terminée par l'émergence (tardive) de l'entité politique tarasque, une équipe d'archéologues français a travaillé, de 1983 à 1996, sur une région de 1 000 kilomètres carrés au Centre-Nord du Michoacan et, plus précisément, à proximité de la ville coloniale et moderne de Zacapu. La principale source écrite sur les Tarasques préhispaniques, que l'on date de 1540, la *Relation de Michoacan*, indique en effet que c'est aux environs de Zacapu que se serait installé un premier chef, ancêtre des futurs souverains tarasques, investi d'une mission de conquête d'un territoire par le dieu tutélaire de ce peuple.

Dans l'histoire de cette région, un tournant très net a été décelé aux alentours de 1250, qui pourrait coïncider avec l'arrivée d'un chef conquérant mentionnée par la *Relation de Michoacan*. Il s'agit fondamentalement d'une réorganisation de l'habitat : de nombreux villages situés au Nord de la région étudiée sont alors abandonnés, et simultanément, quelques grands établissements sont fondés et occupés dans une zone *a priori* peu hospitalière, puisque constituée de coulées de laves relativement récentes, et connue aujourd'hui d'ailleurs sous le nom évocateur de «Malpais» de Zacapu. À cet endroit, on a repéré et étudié principalement quatre gros sites qui semblent s'être développés rapidement. Ils s'étendent sur des surfaces comprises entre 50 et 150 hectares ; la densité des maisons y fluctue de 730 à 2 000 par kilomètre carré, et l'on estime leur population cumulée à 15 000 personnes au moins. Certes, il n'y a pas, à partir du XIIIe siècle, que de grandes agglomérations : villages et hameaux existent toujours. Toutefois, l'apparition de sites d'une taille et d'une structure inédites jusque-là dans la région pourrait bien être la traduction concrète de la mise en place de nouvelles structures socio-politiques, marquées notamment par le renforcement du contrôle exercé sur la population ordinaire par les dirigeants.

Dans les sites de cette période, petits ou grands, l'unité résidentielle classique est une maison généralement carrée, plus rarement ronde, dont la surface intérieure varie de 10 à 45 mètres carrés. Il existe quelques structures de formes semblables plus petites encore, mais, dans plusieurs cas, on a vérifié qu'il s'agissait d'annexes de maisons. Malgré l'ampleur de la variation des surfaces, il n'est guère possible de distinguer des catégories claires et d'isoler, par exemple, un habitat pauvre (petit), ordinaire (d'une taille moyenne) et noble (quelques grandes résidences). Toutes les maisons étaient initialement pourvues de murs en matériaux périssables sur un soubassement de pierres, de 50 centimètres de haut en moyenne ; au centre de chaque habitation, on trouve très souvent un foyer rectangulaire de pierres.

Dans les sites de type urbain, les maisons et leurs éventuelles annexes auraient été organisées en quartiers. De nombreux centres cérémoniels, de composition identique, que l'on trouve disséminés dans ces sites, auraient servi de cœur à chaque quartier. Les sources écrites ne nous informent-elles pas que Tzintzuntzan, la dernière capitale tarasque, était divisée en 15 quartiers? Chaque centre cérémoniel comporte une pyramide donnant sur une place pourvue d'un ou de plusieurs autels et près de laquelle on trouve aussi au moins une «maison» de grandes dimensions (plus de 70 mètres carrés) qui aurait abrité les réunions de divers notables : anciens, prêtres, guerriers... À l'intérieur de chacun des quatre sites urbains du Malpais de Zacapu, une pyramide (et les structures associées) domine toutes les autres par ses dimensions : elle aurait été le centre névralgique de chaque agglomération. Enfin, l'un des quatre sites, nommé aujourd'hui «El Palacio», aurait possédé un ensemble de bâtiments monumentaux qui le distingue des autres : il aurait été le siège de la principale autorité régionale.

Dominique MICHELET, CNRS UPR 312



Gregory Pereira

Le site tarasque dit «Las Iglesias del Infiernillo» couvre une superficie d'environ 140 hectares. La prospection systématique dont il a fait l'objet a permis, entre autres, de fixer ses limites, de positionner les 22 centres cérémoniels *(triangles bleus)* qu'il comporte et de calculer la densité de l'habitat. Chaque centre cérémoniel aurait été au centre d'un quartier, sauf le plus grand d'entre eux *(triangle vert)* : situé dans une zone peu construite ce serait un sanctuaire principal.

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

construisant des terrasses sur les pentes et dans les ravins. Les espaces libres entre les maisons sont certainement cultivés eux aussi.

La culture du coton occupe une superficie importante dans cette partie de l'Empire aztèque, et la production domestique d'étoffes devient la principale activité artisanale. Toutes les maisons ont livré de nombreux objets en céramique utilisés pour le filage manuel du coton : des pesons sphériques que l'on enfile sur chaque fuseau pour augmenter son poids et donc sa stabilité, et des coupelles tripodes sur lesquelles on appuie la base du fuseau afin d'éviter qu'il ne se déplace latéralement. Les textes du XVIe siècle nous l'indiquent : toutes les femmes aztèques, de la plus humble esclave à la plus noble, filent et tissent. Les étoffes réalisées servent à la confection des vêtements, mais elles ont deux autres fonctions : elles sont l'objet de tribut le plus demandé par les cités-États et par l'Empire aztèque, et elles servent d'étalon monétaire, la valeur de n'importe quel bien étant calculable par rapport à une pièce de tissu de dimensions courantes.

Des battoirs à écorce en basalte montrent que des habitants de ces sites produisent aussi du papier à partir de l'écorce d'une espèce de ficus. Avec ce papier, les Aztèques fabriquent des livres où ils consignent des informations historiques, économiques ou religieuses, avec leur écriture faite principalement de pictogrammes ; il leur arrive aussi de le brûler en offrandes rituelles.

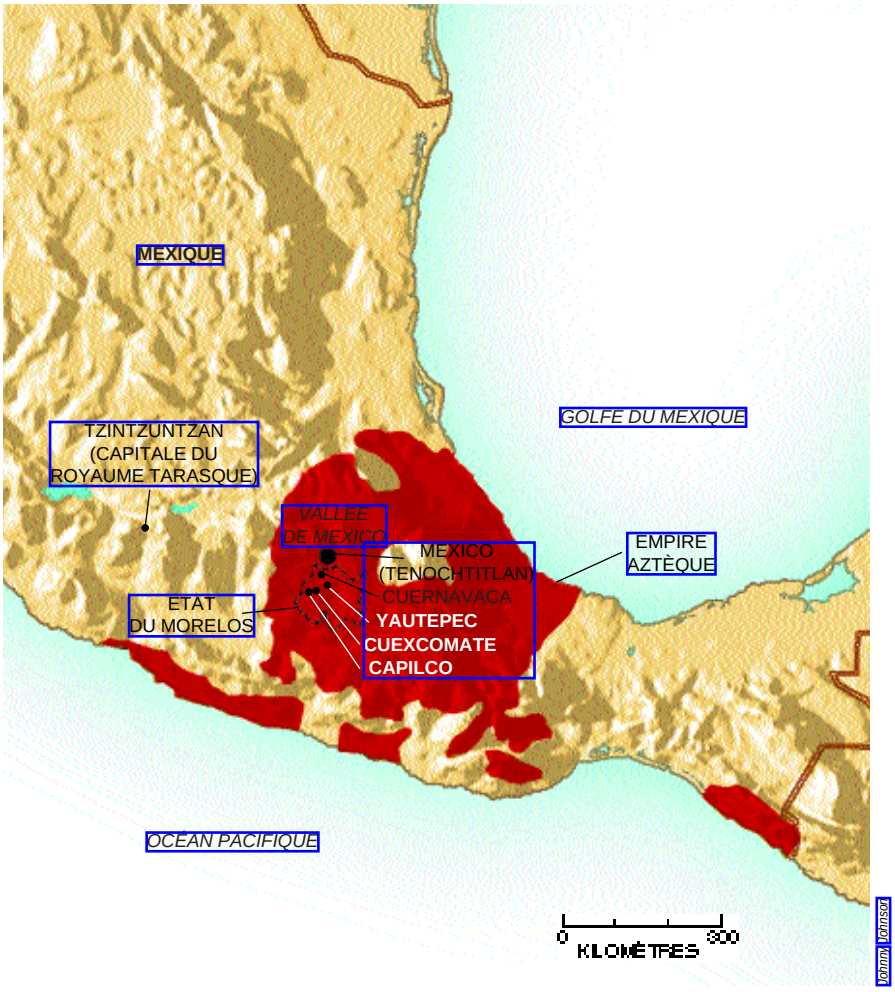
L'abondante vaisselle en céramique associée aux habitations révèle l'existence d'échanges commerciaux sur de longues distances : dix pour cent des poteries proviennent de la vallée de Mexico ou d'autres régions plus lointaines. La principale différence extérieure entre ces récipients et ceux des potiers locaux tient à la décoration : leurs possesseurs recherchaient simplement le plaisir de la variété.

Par divers réseaux commerciaux, où la poterie n'est pas le seul bien échangé, les habitants de ces agglomérations rurales sont en relation avec ceux d'autres parties de l'Empire aztèque et même des cultures voisines. On a en particulier retrouvé des milliers de lames d'obsidienne, verre volcanique gris, noir ou verdâtre provenant de gisements distants d'au moins 100 kilomètres. Les bords de ces lames, très coupants, ont de nombreux usages domestiques et artisanaux. Des aiguilles et d'autres objets en bronze proviennent apparemment de l'Ouest du Mexique. Du sel, produit dans la vallée de Mexico à partir des eaux saumâtres du lac de Texaco que l'on faisait bouillir et évaporer, est importé dans des bassines spéciales, dont les maisons contiennent de nombreux tessons.

Ces fouilles donnent aussi, pour la première fois, un aperçu des rites domestiques des paysans aztèques. Chaque maison contient des restes d'encensoirs et des figurines en céramique représentant des hommes et des divinités. Ces objets sont utilisés dans des célébrations domestiques de purification et de guérison, dont la célébration complète les rituels publics plus spectaculaires. Ces derniers, qui se déroulent sur les imposantes pyramides couronnées de temples des grandes cités, sont décrits en détail par les religieux espagnols arrivés peu après Cortés ; les archéologues en ont retrouvé des traces précises lors, notamment, des fouilles de la pyramide principale de Tenochtitlán, menées à partir de 1978.

Une résidence noble

Cuexcomate, agglomération plus étendue que Capilco, a aussi une organisation plus complexe. Son centre est construit autour d'une place dont le côté Est est bordé par un petit soubassement pyramidal surmonté d'un temple et dont le côté Sud est occupé par un groupe résidentiel nettement plus grand que les autres habitations (540 mètres carrés). Avec une forme de U, cette résidence a ses pièces édifiées sur des plates-formes à murs de pierre. Les pièces sont ici construites avec des matériaux plus nobles, et plus soi-



3. L'EMPIRE AZTÈQUE couvrait la majeure partie du Mexique central et méridional lorsque les conquérants espagnols arrivèrent, en 1519. Les sites décrits dans cet article étaient dans les provinces de Cuauhnahuac et de Huaxtepec, englobées aujourd'hui dans l'État du Morelos. Quatre fois par an, les habitants de ces provinces versaient un lourd tribut de textiles en coton et d'autres produits à la capital impériale, Tenochtitlán.

gneusement que la plupart des habitations. Notamment, les murs sont recouverts d'une couche de stuc. Ces caractéristiques et la similitude du plan avec celui des palais aztèques laissent penser qu'il s'agit de la résidence d'une famille noble.

La richesse des nobles s'exprime par la quantité d'objets qu'ils possèdent, non par leur qualité : dans cette demeure, nous avons retrouvé plus d'objets que dans les habitations populaires, mais ils sont de même nature. Les céramiques importées et décorées étaient également plus nombreuses, mais les pièces importées les plus précieuses, tels des bols polychromes provenant du centre religieux de Cholula, des objets en bronze et des bijoux de jade, sont présentes dans toutes les maisons. Toutes les classes sociales ont donc accès au vaste réseau commercial aztèque du Mexique central.

Entre 1430 et 1440, l'Empire aztèque conquiert la région où se trouvent Capilco et Cuexcomate. Peu après, la résidence noble de Cuexcomate est abandonnée, et une nouvelle résidence noble, plus petite, est érigée par la famille dirigeante sur le côté Nord de la place. La population s'accroît encore : de 200 à 800 habitants à Cuexcomate, et de 35 à 135 habitants à Capilco. Les paysans aménagent de nouveaux champs en terrasse pour répondre aux besoins grandissants de la population, mais les rendements agricoles commencent à décroître lorsque les dernières terres disponibles, forcément de moindre valeur, sont mises en culture.

Au cours de cette période, les foyers sont moins prospères. Les nobles, comme le reste de la population, possèdent de moins en moins de biens importés et moins de vaisselle décorée. La richesse des uns et des autres, mesurée à partir des quantités d'objets de valeur trouvés dans chaque maison, diminue donc nettement. Les paysans luttent contre leurs difficultés économiques en augmentant leur production textile : sur chaque site, les maisons équipées du plus grand nombre d'objets servant à filer le coton sont aussi les plus pauvres. La même observation a été faite dans plusieurs autres régions du monde où la surpopulation et la rareté des terres conduisent à un déclin économique, les plus pauvres palliant l'insuffisance des récoltes et le manque de terres cultivables par l'artisanat.

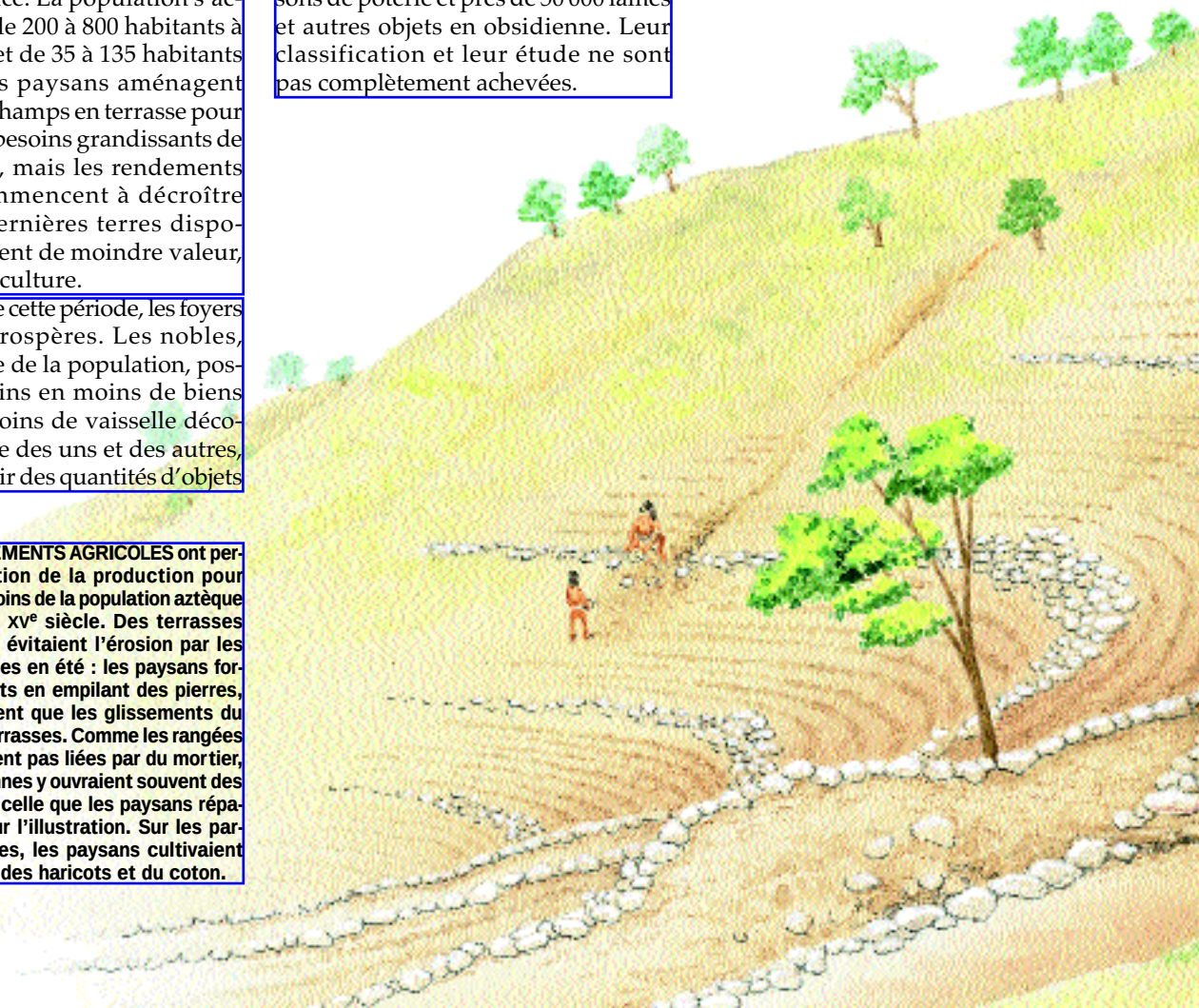
La vie urbaine

Comment vivaient les populations urbaines? Pour le savoir, nous avons fouillé des maisons de Yautepec, la capitale d'une puissante cité-État, qui s'étendait sur environ deux kilomètres carrés et qui est aujourd'hui partiellement recouverte par une ville coloniale et moderne. En 1992, nous avons repéré les limites de la ville aztèque, relativement visibles sous la ville moderne. Puis, en 1993, nous avons fouillé sept maisons avec leurs cours. En six mois, nous avons récolté 1,2 million de tessons de poterie et près de 50 000 lames et autres objets en obsidienne. Leur classification et leur étude ne sont pas complètement achevées.

Cinq des sept maisons fouillées à Yautepec étaient de petites habitations populaires, d'une surface moyenne de 26 mètres carrés. Comme leurs équivalents ruraux, elles étaient construites en briques d'argile crue posées sur des fondations en pierre. Nous avons aussi fouillé une résidence de nobles de 430 mètres carrés, où la maçonnerie en pierres taillées avait été recouverte de stuc. Une autre maison, mal conservée, de taille intermédiaire (80 mètres carrés), n'est pas attribuée avec certitude à une catégorie sociale.

Les familles populaires de Yautepec, comme celles de Capilco et de Cuexcomate, possèdent des marchandises importées : les habitations de Yautepec renferment les mêmes types de céramiques importées, d'objets en obsidienne, en bronze et en jade, ainsi que des récipients pour le sel. Nous devons toutefois encore étudier ces objets avant de faire des comparaisons quantitatives.

Des analyses physico-chimiques sont aussi en cours pour déterminer l'origine des diverses matières premières utilisées. Nous savons déjà que la majeure partie de l'obsidienne provient d'un gisement proche de la

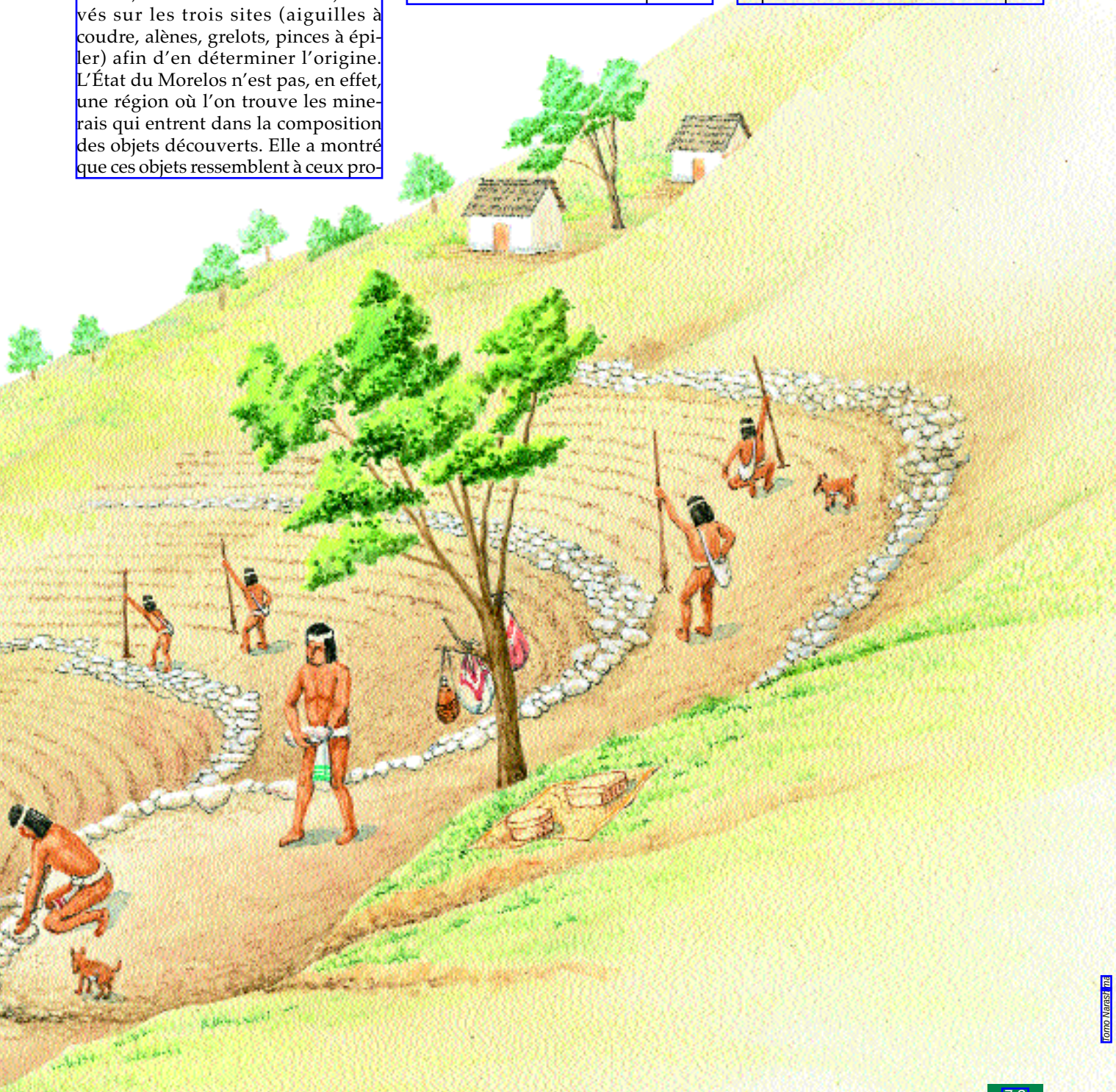


4. DES AMÉNAGEMENTS AGRICOLES ont permis l'augmentation de la production pour répondre aux besoins de la population aztèque en expansion au XVe siècle. Des terrasses fixaient le sol et évitaient l'érosion par les pluies, torrentielles en été : les paysans formaient des murets en empilant des pierres, puis ils attendaient que les glissements du sol forment les terrasses. Comme les rangées de pierres n'étaient pas liées par du mortier, les pluies diluviennes y ouvraient souvent des brèches, comme celle que les paysans réparent à gauche sur l'illustration. Sur les parcelles ainsi créées, les paysans cultivaient surtout du maïs, des haricots et du coton.

ville moderne de Pachuca, située au Nord de la vallée de Mexico. L'analyse, par l'étude pétrographique de coupes minces, par exemple, de la composition des céramiques nous aidera à distinguer les poteries fabriquées dans la vallée de Yautepec de celles qui furent importées d'autres régions du Mexique central.

Dorothy Hosler, de l'Institut de technologie du Massachusetts, a étudié la composition chimique, la forme et les propriétés métallurgiques d'objets en bronze (alliages de cuivre et d'étain, ou de cuivre et d'arsenic) trouvés sur les trois sites (aiguilles à coudre, alènes, grelots, pinces à épiler) afin d'en déterminer l'origine. L'État du Morelos n'est pas, en effet, une région où l'on trouve les minerais qui entrent dans la composition des objets découverts. Elle a montré que ces objets ressemblent à ceux produits dans le royaume tarasque du Mexique occidental. En comparant la teneur en isotopes du plomb (les formes de l'atome de plomb qui se distinguent par le nombre de neutrons du noyau) des minerais de plusieurs gisements et des objets trouvés à Yautepec, elle a confirmé que certains objets en bronze de Yautepec correspondent à des minerais du territoire tarasque. Bien que les sources écrites décrivent les conflits et les guerres qui ont marqué les relations entre Aztèques et Tarasques, le bronze et l'obsidienne tarasques traversaient donc les frontières et arrivaient jusque dans les foyers populaires des provinces aztèques.

La vie des habitants de Yautepec se distingue en définitive de celle des ruraux par la pratique d'activités artisanales plus diverses, qui vont au-delà de la production domestique de textiles. Plusieurs foyers taillaient des lames d'obsidienne et, dans certaines fouilles, on a retrouvé des indices d'une production de «boucles de lèvres», de boucles d'oreilles et d'autres bijoux en obsidienne. Nous avons aussi retrouvé en plusieurs endroits des moules pour



Tomo Narashima

la fabrication de pesons de fuseau et de figurines en céramique, ainsi que des battoirs à écorce pour la fabrication du papier.

Au total, les habitants des provinces aztèques étaient donc relativement prospères et entreprenants. Malgré un déclin économique après leur intégration dans l'Empire aztèque, la population ordinaire des villes et des campagnes achetait, sur les marchés, diverses marchandises importées. Les textes historiques ne mentionnent pas que l'État aztèque avait la haute main sur les activités commerciales qui se déroulaient sur les marchés ; l'archéologie semble confirmer cette non-ingérence dans les échanges ordinaires. Les marchés reliaient les habitants, même des plus petits villages, au vaste réseau de l'économie non encadrée du Mexique central. Le pouvoir des nobles, qui paraissent avoir possédé une majorité des terres et qui monopolisaient les charges politiques, s'exerçait surtout par la perception du tribut. Ce pouvoir n'aurait toutefois pas constitué une charge insupportable et ne se serait guère exercé sur l'artisanat ni sur le commerce.

Michael SMITH est professeur d'anthropologie à l'Université de l'État de New York.

Jacques SOUSTELLE, *Les Aztèques*, «Que sais-je?», n° 1391, PUF, 1970.

Patricia RIEFF ANAWALT et Frances F. BERDAN, *Le Codex Mendoza*, in *Pour la Science*, août 1992.

M.E. SMITH, *Archaeological Research at Aztec-Period Rural Sites in Morelos, Mexico, vol. 1 : Excavations and Architecture*, University of Pittsburgh Memoirs in Latin American Archaeology, n° 4, 1992.

Economies and Polities in the Aztec Realm, sous la direction de Mary G. Hodge et Michael E. Smith, Institute for Mesoamerican Studies, State University of New York at Albany, 1994.

Codex Azcatitlan, Bibliothèque nationale de France - Société des américanistes, 1995.

Michel GRAULICH, *Montezuma, ou l'apogée et la chute de l'empire aztèque*, Éditions Fayard, 1995.

Michael E. SMITH, *The Aztecs*, Blackwell Publishers, 1996.

Dorothy HOSLER et Andrew MACFARLANE, *Copper Sources, Metal Production and Metals Trade in Late Postclassic Mesoamerica*, in *Science*, vol. 273, pp. 1819-1824, 27 septembre 1996.

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

Le laser *Mégajoules*

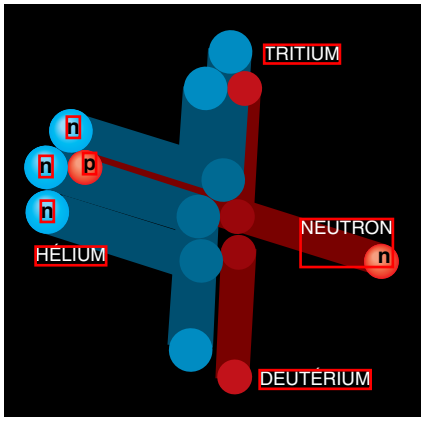
JACQUES COUTANT

Ce laser, en construction près de Bordeaux, devrait faire progresser la physique des plasmas thermonucléaires et provoquer la fusion nucléaire contrôlée du deutérium et du tritium.

En 1960, l'Américain Theodore Maiman utilise le principe de l'émission stimulée, prédit théoriquement par Albert Einstein, et celui du pompage optique, mis au point par le physicien français Alfred Kastler, pour réaliser le premier laser. Seulement trois ans plus tard, les physiciens du Commissariat à l'énergie atomique, à Limeil-Valenton, utilisent un laser à rubis fabriqué par la *Compagnie générale d'électricité* pour étudier l'interaction des lasers de forte puissance avec la matière. Le vif intérêt pour ce nouvel outil s'explique aisément : les lasers à impulsions sont des sources très intenses de lumière monochromatique (une seule longueur d'onde) et cohérente (les oscillations du champ électromagnétique qui constitue la lumière restent en phase pendant un grand nombre de périodes) ; on peut donc les focaliser dans des volumes très petits, de sorte que si les énergies transportées par le faisceau sont limitées, elles portent la matière à des températures et à des pressions inégalées.

Les premiers travaux, tant théoriques qu'expérimentaux, sont consacrés à l'étude de phénomènes tels que l'absorption simultanée de plusieurs photons (ou «grains de lumière»), conduisant à l'ionisation de la matière et à la création de plasma, sorte de gaz composé d'ions et d'électrons dissociés des atomes ; on explore également les mécanismes de l'absorption et du transport de l'énergie dans ce plasma.

Puis, à mesure que progresse la puissance des lasers, les caractéristiques des plasmas produits se rapprochent du domaine où les réactions thermonucléaires deviennent importantes, ce qui permet de mieux connaître les phénomènes physiques liés à la fusion par confinement inertiel, laquelle est à la base des engins thermonucléaires (bombes H) et pourrait aussi être utilisée dans de futurs réacteurs producteurs d'électricité.



Les connaissances acquises en 30 ans, les progrès théoriques et les avancées de la simulation numérique, à l'aide de superordinateurs, permettent aujourd'hui de définir les caractéristiques de l'installation nécessaire pour l'obtention de la fusion par confinement inertiel en laboratoire : c'est le laser *Mégajoules*, dont la construction a été décidée par le gouvernement au début 1995. Le laser devrait effectuer ses premiers tirs au Centre d'études scientifiques et technique d'Aquitaine, près de Bordeaux, dans les premières années du siècle prochain.

La fusion par confinement inertiel

La fusion nucléaire de deux noyaux atomiques légers formant un noyau plus lourd s'accompagne d'un dégagement d'énergie considérable. Pour que cette fusion se fasse, il faut surmonter la répulsion coulombienne, qui s'exerce entre les deux noyaux positivement chargés, ce qui nécessite que les noyaux soient animés d'une vitesse relative importante. On obtient de telles vitesses dans l'état de plasma chaud. La réaction la plus facile à obtenir est celle qui fait intervenir deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium, composé d'un proton et d'un neutron) et le tritium, composé d'un proton et de deux neutrons ; la fusion forme un noyau d'hélium (deux protons, deux neutrons) et un neutron, qui emportent chacun une énergie considérable.

Les physiciens cherchent à obtenir, en laboratoire, des conditions où le milieu fusible produit un nombre suffisant de réactions nucléaires, de sorte que l'énergie dégagée soit supérieure à celle qui a été initialement dépensée. Ces conditions nécessaires sont théoriquement décrites par le critère de Lawson (du nom de son inventeur, le physicien américain Christopher Lawson) : le produit de la densité du plasma par le temps pendant lequel son énergie reste confinée doit être supérieur à un seuil ; en outre, la température doit être supérieure à 100 millions de degrés.

Historiquement, la première voie étudiée, depuis plus de 40 ans, est celle du «confinement magnétique», où l'on cherche à maintenir confiné pendant un temps assez long (de l'ordre de la seconde) un plasma peu dense, à l'aide de champs magnétiques. La seconde voie est celle du confinement inertiel : en un temps extrêmement bref, un apport externe d'énergie porte une faible quantité de matière fusible à l'état de plasma, la chauffe et la comprime, de sorte qu'elle devient le siège d'un nombre notable de réactions nucléaires. La masse de matière fusible serait au plus de quelques dizaines de microgrammes, limitée par la puissance maximale des lasers imaginables et par la résistance des chambres de

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

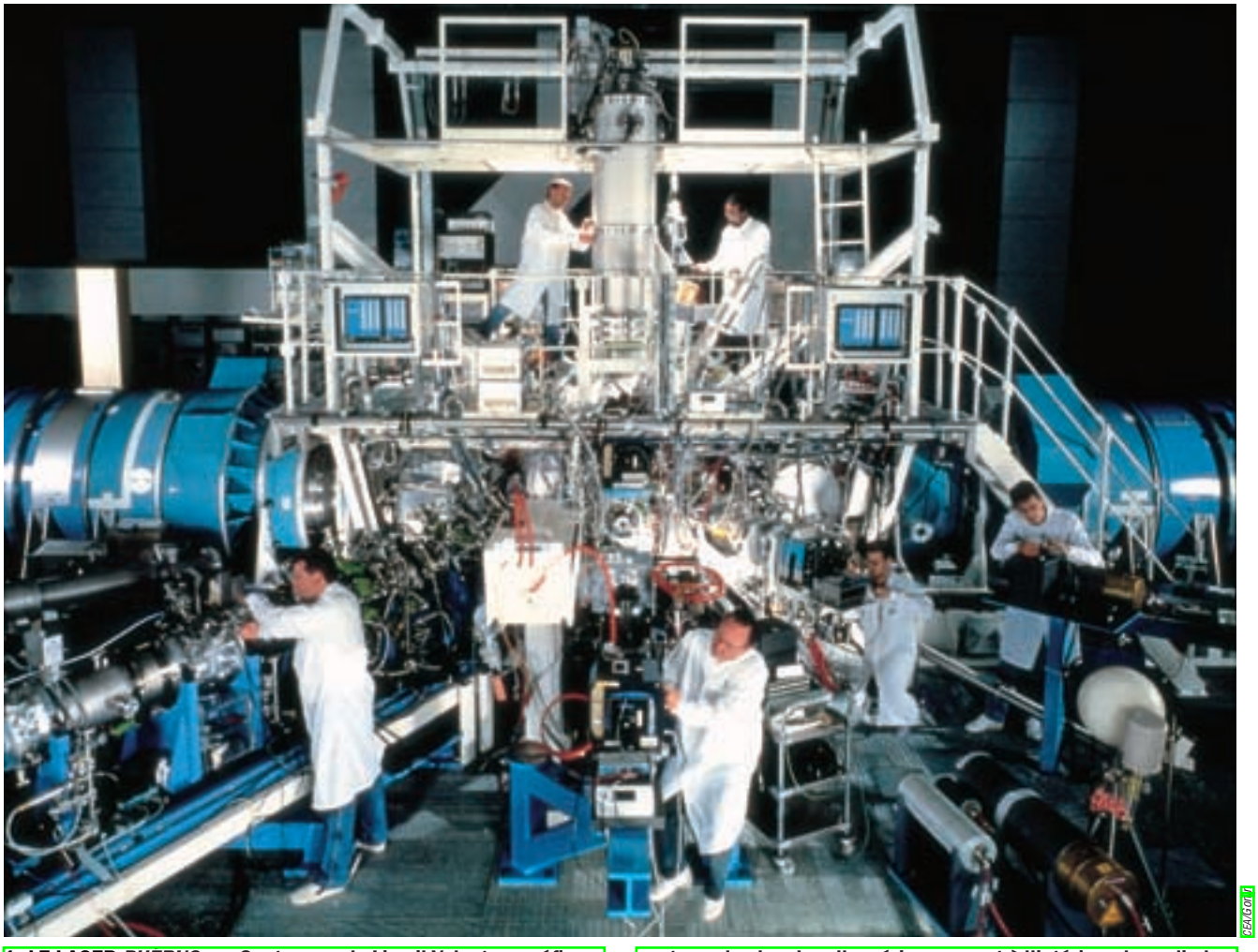
confinement : l'énergie dégagée serait de quelques dizaines de mégajoules (de quoi chauffer et évaporer quelques litres d'eau).

En pratique, le milieu fusible serait un mélange, en proportions égales, de deutérium et de tritium, que l'on emprisonnerait dans une petite capsule sphérique en verre ou en plastique de quelques centaines de micromètres de diamètre et de quelques micromètres d'épaisseur. Dans les expériences effectuées avec les installations existantes, comme le laser *Phébus*, du Centre CEA de Limeil-Valenton, le deutérium et le tritium sont mélangés sous forme gazeuse à une pression de quelques dizaines d'atmosphères. Toutefois, dans les expériences avec le laser *Mégajoules*, le mélange devra être sous forme d'une mince couche solidifiée (par refroidissement, à la température de –250 °C) sur la face interne de la capsule et en équilibre avec le gaz de la partie centrale. Le laser éclairera, directement ou indirectement, comme on le verra plus loin, la surface extérieure de la capsule, de sorte qu'il formera un plasma : les photons seront absorbés par le plasma, et leur énergie sera communiquée aux électrons. Cette absorption sera d'autant plus intense que la densité sera élevée, mais elle sera limitée à une valeur de densité maximale, la densité critique, pour laquelle la fréquence plasma (la fréquence naturelle d'oscillation des électrons) est égale à la fréquence de l'onde électromagnétique : à cette densité, la lumière est réfléchie, de la même façon que les ondes radio sont réfléchies vers la Terre quand elles rencontrent l'ionosphère (au-dessus de l'atmosphère terrestre). La densité critique est inversement proportionnelle au carré de la longueur d'onde du laser, et elle est environ égale à un centième de la densité du solide, pour une longueur d'onde de un micromètre, qui est celle du laser le plus utilisé, le laser à verre dopé au néodyme.

La lutte contre les instabilités

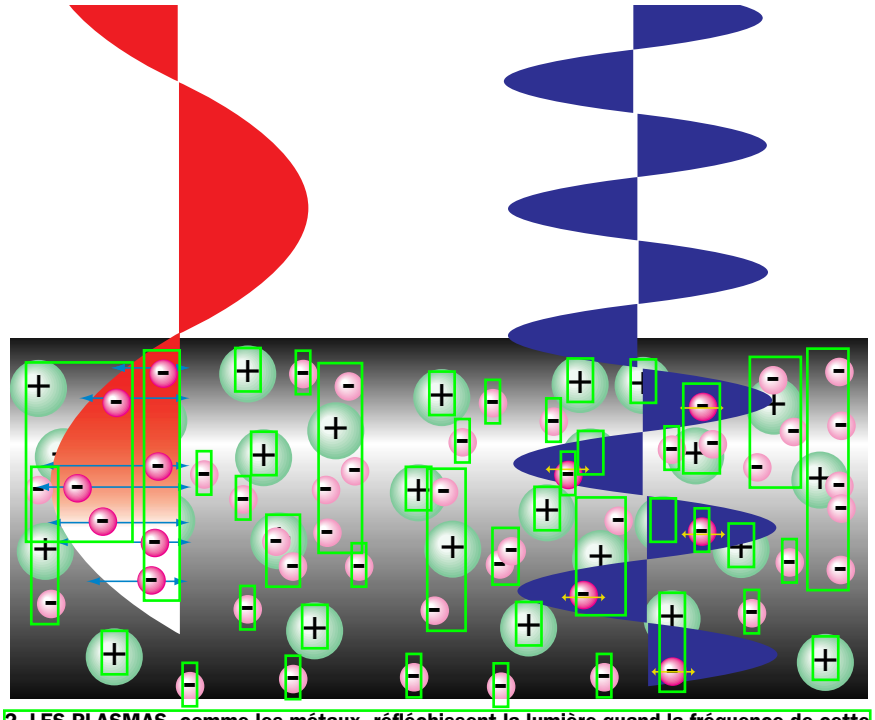
Si la théorie du confinement inertiel est simple, les écueils abondent. Notamment, lorsque la lumière devient très intense, des mécanismes d'instabilités peuvent se déclencher, en raison de couplages entre l'onde électromagnétique incidente et des ondes qui se propagent dans le plasma (ondes de pression, onde plasma ou ondes électromagnétiques). Ces instabilités sont nuisibles, car elles peuvent réduire gravement l'absorption de lumière et créer des particules rapides, qui, venant préchauffer le milieu fusible avant qu'il soit comprimé, s'opposent à cette compression.

Comme ces couplages augmentent avec la longueur d'onde de la lumière, les expériences actuelles n'utilisent pas directement les lasers les plus puissants, qui émettent à une longueur d'onde de un micromètre (dans le



CEA/Gorin

1. LE LASER *PHEBUS*, au Centre CEA de Limeil-Valenton, préfigure le laser *Mégajoules*, où l'on cherchera à obtenir la fusion nucléaire. À gauche et à droite, en bas, les deux faisceaux laser qui convergent vers la chambre d'expériences sont à l'intérieur des cylindres bleus. Le cylindre supérieur permet de descendre la cible au centre de la chambre, lors des expériences.



2. LES PLASMAS, comme les métaux, réfléchissent la lumière quand la fréquence de cette dernière est inférieure à la «fréquence plasma». Quand une onde de fréquence faible (à gauche) arrive à la surface d'un plasma, le champ électrique associé à l'onde met en mouvement les électrons à la fréquence de l'onde ; or une charge qui oscille émet une onde à la fréquence de l'oscillation : la lumière est réfléchie. En revanche, quand la fréquence est supérieure à la fréquence plasma (cette fréquence croît avec la densité du plasma), les électrons ne peuvent plus suivre la sollicitation électrique, et l'onde est transmise.

proche infrarouge) : à l'aide de cristaux optiquement actifs, on transforme d'abord leur rayonnement en longueur d'onde de 0,5 micromètre (dans le vert) ou de 0,35 micromètre (dans le proche ultraviolet).

La vaporisation de la partie externe de la capsule a deux effets simultanés. D'une part, la couronne de plasma ainsi formée absorbe l'énergie lumineuse et la transmet vers l'intérieur par conduction thermique. D'autre part, le mélange fusible à l'intérieur de cette capsule est comprimé : comme la matière qui est expulsée de la couronne emporte une quantité de mouvement centrifuge, le reste est projeté vers le centre, avec une quantité de mouvement inverse. Ainsi l'accélération centripète comprime la capsule et échauffe le milieu fusible. Plus cette compression est régulière, meilleure est la performance finale atteinte : le produit de la densité par la température est maximal. D'où la nécessité d'éviter le préchauffage par des particules rapides.

Si la capsule avait une forme initiale parfaitement sphérique, si le laser l'éclairait de façon parfaitement uniforme, la compression maintiendrait la symétrie initiale de la matière. Pour les théoriciens, cette symétrie est importante, parce qu'elle simplifie l'étude des phénomènes, en les ramenant à une seule dimension.

En réalité, toutefois, la capsule présente de légers défauts de surface et d'épaisseur, et l'éclairement du laser est hétérogène. En outre, les défauts initiaux s'amplifient pendant la compression, d'autant que la capsule est le siège de diverses instabilités hydrodynamiques qui font croître les défauts de façon exponentielle et peuvent conduire à la destruction de l'enveloppe et au mélange du milieu fusible avec le matériau de la capsule.

La plus connue de ces instabilités est celle de Rayleigh-Taylor, qui apparaît lorsque la densité et la pression varient en sens inverse. Cette instabilité apparaît notamment quand on dépose de l'eau sur de l'huile : la pression augmente du haut vers le bas, tandis que la densité varie en sens inverse ; l'instabilité provoque la remontée de l'huile et la chute de l'eau. Les diverses instabilités sont étudiées théoriquement et expérimentalement depuis des années, à l'aide de lasers, mais aussi avec d'autres moyens, tels les canons à gaz ou les explosifs ; les essais nucléaires, également, ont apporté nombre de renseignements.

Pour chaque type d'instabilité, il existe un seuil de défaut au-dessous duquel elle ne se déclenche pas, une vitesse de croissance et un niveau de saturation. Bien que plusieurs questions ouvertes subsistent, le développement des instabilités est bien compris et, dans de nombreuses expériences, l'accord entre les résultats des mesures et ceux des prévisions théoriques est très satisfaisant. On a ainsi calculé le niveau maximal de défauts initiaux tolérables, tant en ce qui concerne la fabrication de la capsule qu'en ce qui concerne l'éclairement.

Attaque directe ou indirecte ?

Comment éclairer uniformément ? D'une part, on doit utiliser un grand nombre de faisceaux, dont la superposition sur la capsule doit être ajustée avec soin ; d'autre part, à l'intérieur de chaque tache focale, l'éclairement ne doit pas présenter de variations brusques qui seraient dues à des interférences ; enfin, à chaque instant, la puissance de tous les faisceaux laser doit varier exactement de la même façon, afin qu'aucun d'entre eux ne pousse localement plus ou moins que les autres, déclenchant des instabilités hydrodynamiques.

Heureusement la poussée se «lisse» naturellement : l'absorption de la lumière est limitée à la densité critique, inférieure à la densité du bord extérieur de la capsule avant l'ablation. Il existe donc une couche de plasma qui transmet la poussée, mais en la lissant un peu, à la manière d'un oreiller.

Par ailleurs, pour éviter les points chauds dus aux interférences, lesquelles résultent de la cohérence de la lumière laser, de nombreux procédés ont été mis au point. Parmi ces méthodes de «lissage optique», celle qui a été inventée et expérimentée avec succès à Limeil-Valenton consiste à utiliser un laser dont l'émission n'est pas parfaitement monochromatique, de sorte que sa durée de cohérence soit faible.

Cette lumière est envoyée dans une fibre optique de large diamètre : la différence de parcours est grande entre les rayons qui se propagent selon l'axe de la fibre, et les rayons qui subissent de nombreuses ré-

flexions contre les parois. Ainsi, les diverses ondes ne sont plus cohérentes à la sortie de la fibre, et elles n'interfèrent pas.

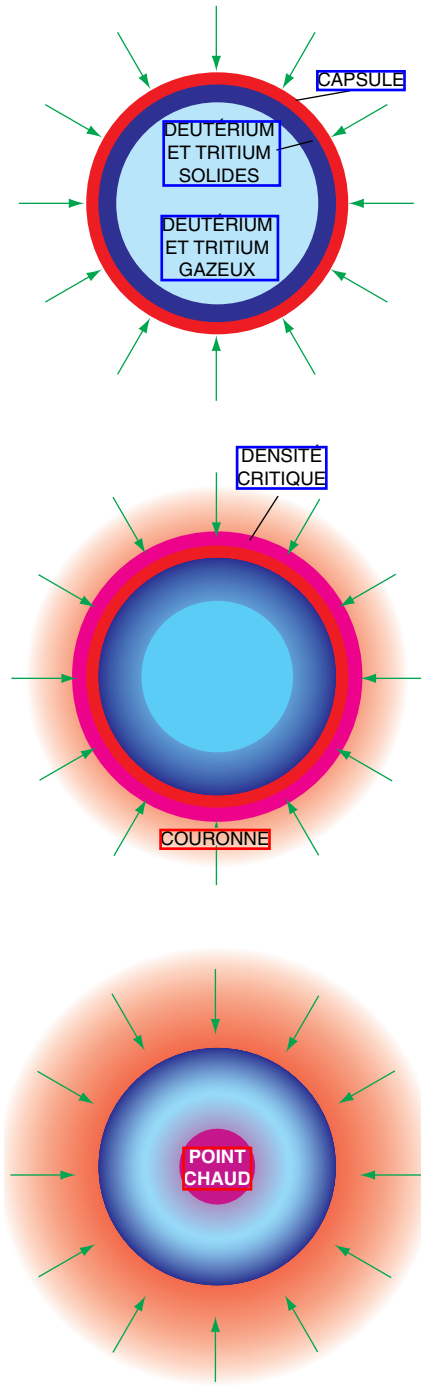
Les simulations sur ordinateur montrent que, pour atteindre un gain suffisant, l'éclairement ne doit pas varier de plus de un pour cent d'un point à un autre de la capsule. C'est une condition redoutable, même si des progrès importants ont été récemment effectués à l'Université de Rochester, avec l'installation *Omega-Upgrade*, qui focalise 60 faisceaux sur une cible.

Aussi, une autre façon d'irradier les cibles a été imaginée et étudiée abondamment, depuis longtemps. Dans cette méthode d'«attaque indirecte», on focalise les faisceaux laser sur la face interne d'une enceinte en matériau de numéro atomique élevé, généralement de l'or. Sous l'action du rayonnement, cette paroi est chauffée, et elle émet un rayonnement X intense, qui est confiné à l'intérieur de l'enceinte. Cette dernière constitue alors une sorte de four pour la capsule qui s'y trouve placée.

Le rôle du four est double : il thermalise le rayonnement, qui devient proche d'un rayonnement de corps noir, et il l'homogénéise par réflexions multiples. Ainsi obtient-on une homogénéité d'éclairement plus facilement qu'en attaque directe, pourvu que la zone interne irradiée soit judicieusement positionnée, que la forme et les dimensions de l'enceinte soient optimisées, et que soit minimisé le défaut introduit par les trous de l'enceinte, indispensables pour laisser passer les faisceaux, mais qui laissent fuir une partie des rayons X.

L'attaque indirecte a été beaucoup étudiée ces dernières années au Laboratoire Lawrence Livermore avec le laser *Nova*, au Japon avec le laser *Gekko 12*, et à Limeil-Valenton avec le laser *Phébus*. Les physiciens ont étudié la conversion du rayonnement laser en rayonnement X, les températures de rayonnement atteintes en cavité et l'homogénéité d'irradiation de la capsule, en fonction des paramètres géométriques et des conditions d'éclairement.

L'avantage incontestable de l'attaque indirecte a toutefois un prix : en introduisant une étape supplémentaire, la conversion X, qui n'a pas un rendement de 100 pour cent, elle nécessite des énergies de laser supérieures à celles qui seraient théoriquement nécessaires en attaque directe ; toutefois, dans cette dernière méthode, les instabilités hydrodynamiques forcent à utiliser des énergies qui sont finalement égales à celles de l'attaque indirecte.



3. LES CIBLES qui seront utilisées dans le laser *Mégajoules* seront composées d'une capsule en verre ou en matière plastique *(en rouge, sur l'image supérieure)*, sur la paroi interne de laquelle on condensera un mélange de deutérium et de tritium, fortement refroidis *(en bleu)* ; le centre de la capsule contiendra le deutérium et le tritium gazeux. Quand on éclairera cette cible à l'aide d'un laser, on vaporisera la capsule *(au centre)*, ce qui, par réaction, projettera le deutérium et le tritium condensés vers le centre. Si l'augmentation de puissance lumineuse et l'épaisseur de la couche condensée sont appropriées, on obtiendra finalement, au centre de la capsule, une zone où la densité et la température permettent la fusion nucléaire *(en bas)*.

La fusion au secours de la fusion

Jusqu'ici, nous avons implicitement supposé que, pendant la compression, le milieu fusible restait homogène, avec des densités et des températures uniformes, jusqu'à ce que les réactions de fusion deviennent prépondérantes. Toutefois, dans cette hypothèse, le calcul de l'énergie du laser nécessaire pour atteindre un gain de quelques unités conduit à des valeurs qui ne paraissent pas réalisables.

Pour contourner la difficulté, les physiciens ont imaginé d'utiliser les réactions de fusion elles-mêmes pour faciliter la combustion. Dans la technique du point chaud central, on provoque d'abord les réactions thermonucléaires au centre de la cible, afin qu'elles se propagent ensuite au reste du combustible, resté relativement froid pendant la compression.

Pour réaliser le point chaud, le centre de la cible doit être gazeux : avec moins de particules à chauffer, on obtient plus facilement la fusion d'un petit nombre de noyaux atomiques qui libèrent des particules alpha (des noyaux d'hélium) et des neutrons énergétiques. Puis le milieu «froid» autour du point chaud doit être suffisamment dense pour que les particules alpha résultant de la fusion du point chaud soient absorbées et déposent leur énergie.

Les simulations sur ordinateur montrent que cette méthode devrait procurer un taux de combustion global de 30 pour cent, correspondant à un gain suffisant (le quotient de l'énergie récupérée par l'énergie apportée), tout en minimisant l'énergie totale à investir dans le milieu.

Pour atteindre ce taux de combustion, la poussée exercée sur la capsule doit croître selon une loi parfaitement déterminée, pendant les quelque 15 à 20 nanosecondes que dure la compression, que la poussée soit transmise directement par les faisceaux laser ou qu'elle soit transmise indirectement par le rayonnement X dans l'enceinte.

Pourquoi un laser *Mégajoules*

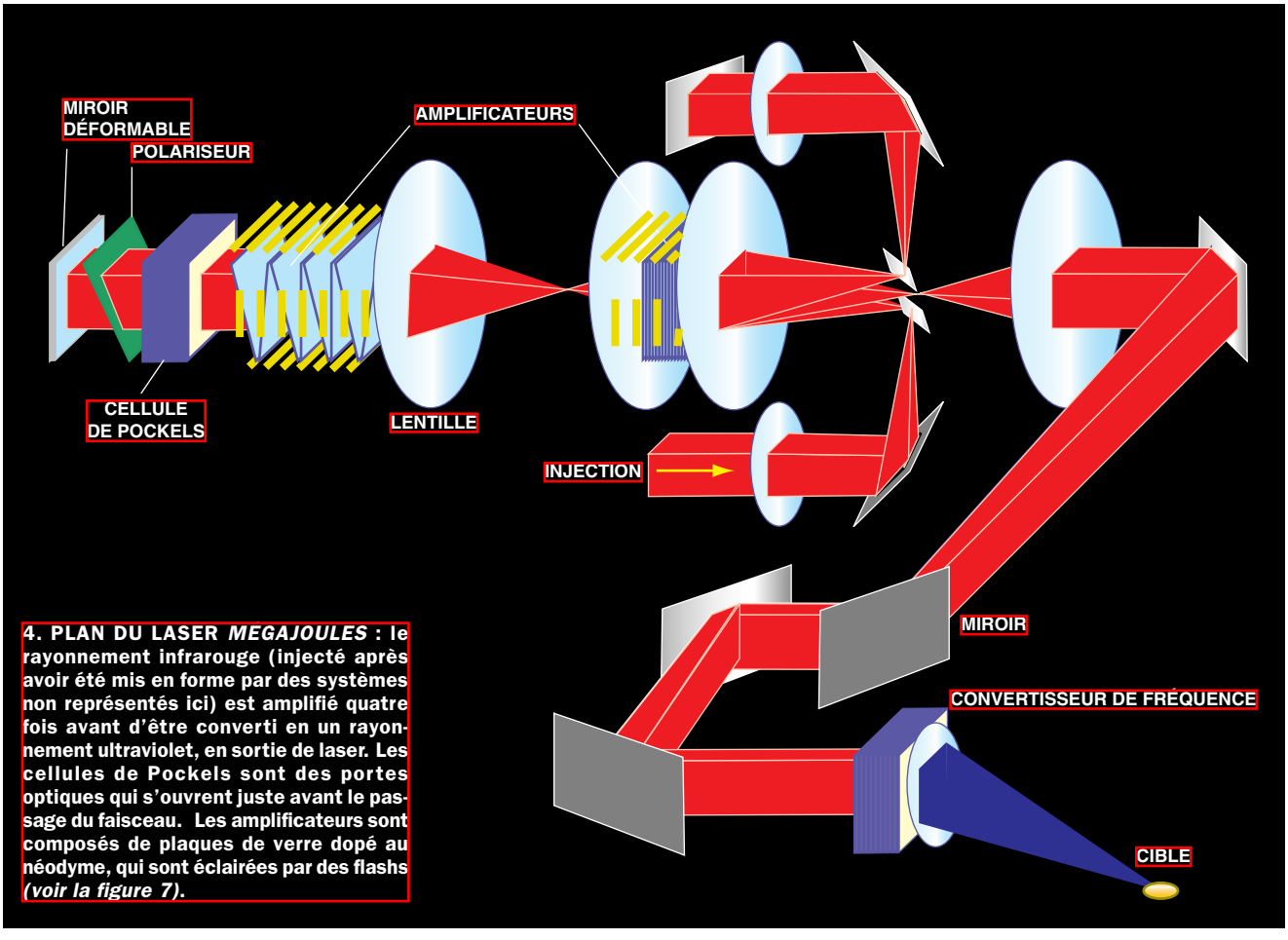
Les lasers les plus puissants à ce jour sont encore très loin de pouvoir créer un point chaud dans le mélange deutérium-tritium ; ils ne permettent donc ni d'en valider le principe, ni d'étudier la propagation d'une onde de combustion thermonucléaire. En revanche, ils ont fait considérablement progresser la connaissance des instabilités hydrodynamiques, de la conversion X, des mouvements de matière sous l'action du rayonnement, etc.

Le laser *Mégajoules* devrait avoir une énergie suffisante pour déclencher une combustion thermonucléaire dans le milieu fusible. Chauffé et comprimé, ce dernier devrait produire en brûlant une énergie dix fois supérieure à celle qui sera apportée par les faisceaux laser.

Ce laser fait, depuis longtemps, l'objet d'une collaboration entre le laboratoire de Limeil-Valenton, en France, et le laboratoire Lawrence Livermore, aux États-Unis. Dès la publication des résultats de l'expérience française qui avait obtenu une émission de neutrons par interaction d'un faisceau laser avec du deutérium solidifié, en 1969, les Américains achetèrent auprès de fabricants français les éléments de leur première installation laser. En contrepartie, les physiciens de Limeil-Valenton purent utiliser, pour la construction du laser *Phébus*, des techniques mises au point à Livermore, pour le laser *Nova*, construit à la même époque. Depuis, la collaboration a été fortement intensifiée autour de la technique des lasers de puissance et des expériences non classifiées. Plusieurs publications internationales sur le «laser X» ont été faites en commun. Un nouvel accord, passé en 1994, couvre les études nécessaires à la préparation du projet français de laser *Mégajoules* et du projet américain *National Ignition Facility* («appareil national d'ignition»). Il est signé pour une durée de dix ans et concerne les études de composants, chaque laboratoire conservant la possibilité de recourir aux industriels de son choix pour les fabrications finales.

Le projet est ambitieux : il s'agit de construire une installation qui produira assez d'énergie pour obtenir, en attaque indirecte, l'ignition du mélange deutérium-tritium, avec création d'un point chaud et combustion thermonucléaire auto-entretenue. Les modélisations confirmées par les simulations numériques, montrent qu'au voisinage de l'ignition, le gain augmente très rapidement, pour devenir supérieur à un.

À l'aide des outils numériques, une cible de référence théoriquement capable d'atteindre l'ignition a été dimensionnée ; sa sensibilité aux variations des paramètres a été étudiée, et l'on en a déduit les caractéristiques du laser nécessaire. Ce dernier doit être très puissant, pour créer une température suffisante dans l'enceinte, mais ses impulsions doivent être courtes, afin que le plasma créé dans l'enceinte, autour de la capsule, n'atteigne pas la densité critique (quand cette densité est atteinte, les faisceaux laser sont réfléchis) ; enfin la répartition de l'éclairement de la cavité doit être tel que la cible soit attaquée de façon aussi homogène que possible, afin d'éviter le développement des instabilités hydrodynamiques.



4. PLAN DU LASER *MEGAJOULES* : le rayonnement infrarouge (injecté après avoir été mis en forme par des systèmes non représentés ici) est amplifié quatre fois avant d'être converti en un rayonnement ultraviolet, en sortie de laser. Les cellules de Pockels sont des portes optiques qui s'ouvrent juste avant le passage du faisceau. Les amplificateurs sont composés de plaques de verre dopé au néodyme, qui sont éclairées par des flashs *(voir la figure 7)*.

La cible sera placée dans une enceinte cylindrique en or ; les faisceaux laser qui pénétreront par deux trous situés sur l'axe seront répartis sur trois nappes, assurant ainsi (d'après les calculs) la meilleure symétrie pour l'irradiation de la capsule. Cette dernière sera une coquille sphérique creuse de matériau plastique, sur la paroi interne de laquelle sera solidifiée une couche du mélange deutérium-tritium. Au centre, ce mélange sera sous forme gazeuse.

La mise en condition de fusion thermonucléaire du combustible suppose des vitesses d'implosion supérieures à 300 000 mètres par seconde, ce qui conduit à des températures radiatives de l'ordre de trois millions de degrés. La pression d'ablation engendrée par une telle température est supérieure à 100 millions d'atmosphères. C'est pour éviter que l'application brusque d'une telle pression ne crée un choc violent générateur de désordre que la puissance du laser augmentera progressivement. Lorsque le choc initial parviendra au centre, dans le mélange fusible gazeux, ce dernier sera chauffé et un point chaud n'apparaîtra qu'au centre de la capsule. Ainsi sera minimisée l'énergie du laser nécessaire : 1,8 mégajoule à la longueur d'onde de 0,35 micromètre.

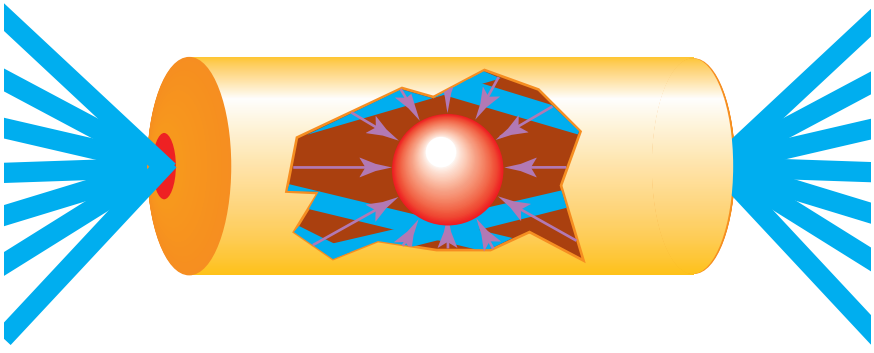
Les éléments d'un laser *Mégajoules*

Divers types de lasers ont été employés pour les études de confinement inertiel, mais seul le laser à verre dopé au néodyme a atteint une maturité technique suffisante pour qu'on puisse l'envisager dans le projet *Mégajoules* (ainsi que dans le projet américain). Toutefois, ce laser émet une onde lumineuse à une longueur d'onde de 1,05 micromètre, trop longue pour atteindre les performances visées. On a donc décidé de transformer son rayonnement en un rayonnement de fréquence trois fois supérieure. Le rendement de la conversion ne dépassant pas 50 à 60 pour cent sur la durée totale de l'impulsion, c'est une énergie de 4 mégajoules qu'il faut obtenir, soit 200 fois l'énergie du laser *Phébus*. Si le laser *Mégajoules* était construit sur le même principe que le laser *Phébus*, il serait un monstre d'un coût rédhibitoire : les laséristes du CEA et du laboratoire Lawrence Livermore ont donc cherché une nouvelle architecture.

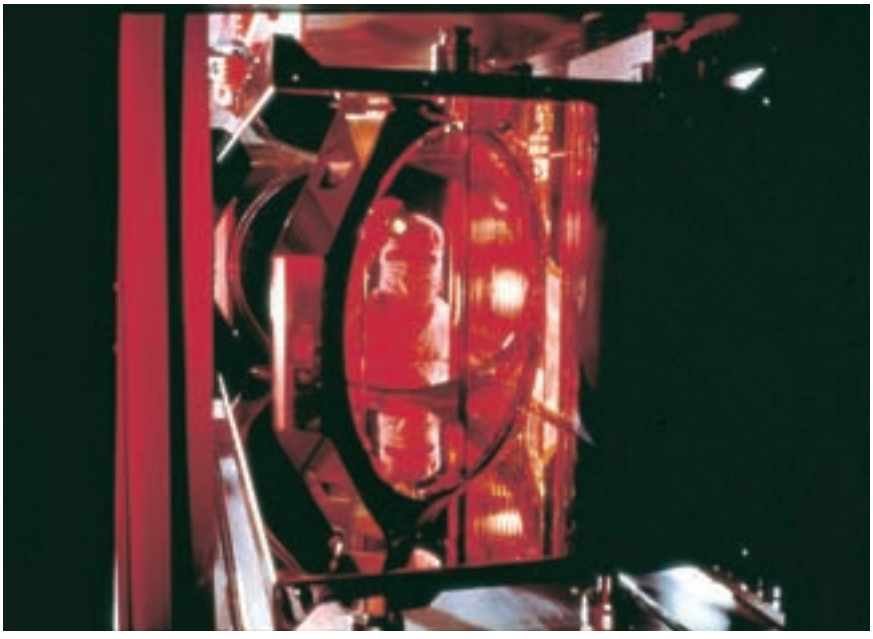
Le laser *Phébus*, est construit, comme ses prédécesseurs, suivant le concept de l'amplification en ligne : un laser classique engendre une impulsion de base, qui est ensuite mise en forme (spatiale et temporelle) par des dispositifs électro-optiques. À ce stade, l'énergie de l'impulsion est inférieure à quelques microjoules. Pour l'amplifier d'un facteur 100 millions à 1 000 millions, on l'envoie dans une succession d'amplificateurs de diamètres croissants (de 1 à 46 centimètres pour le laser *Phébus)*, afin de conserver des densités d'énergie qui n'endommagent pas les matériaux optiques. Les plus fragiles sont les couches minces, déposées sur le verre par évaporation sous vide ou par traitement physico-chimique, afin de le rendre réfléchissant ou, au contraire, parfaitement transparent.

CEA/GDM

5. LA CHAMBRE D'EXPERIENCES du système *Phébus*, vu par dessous, à l'intérieur. Le disque central est le fond du système de descente de la cible. Les tubes qui convergent vers le point où la cible est descendue sont des systèmes de mesures : appareils photographiques à sténopé (où l'optique est réduite à un trou), spectrophotomètres, capteurs pour les mesures de température, de pression et d'énergie...



6. LE LASER *MEGAJOULES* obtiendra la fusion d'un mélange de deutérium et de tritium par une attaque indirecte : la cible est un cylindre en or, où se trouve la capsule d'implosion. Les 240 lasers du système *Mégajoules* viendront chauffer l'or, qui réémettra des rayons X de façon isotrope *(flèches violettes)*.



7. ELEMENT D'AMPLIFICATION du laser *Phébus*. Des flashes disposés autour des plaques de verre excitent les atomes de néodyme (pompage optique) ; lors du passage du faisceau laser, le retour des atomes excités à l'état fondamental amplifie le faisceau (émission stimulée).

On augmente encore l'énergie en multipliant le nombre de faisceaux qui amplifient tous la même impulsion initiale (deux sur le laser *Phébus*, dix sur le laser *Nova*). Entre les amplificateurs, des systèmes optiques augmentent le diamètre du faisceau tout en le gardant parallèle ; des diaphragmes éliminent les déformations de la surface d'onde introduites par les inévitables hétérogénéités des milieux traversés.

De surcroît, des dispositifs électro-optiques ou magnéto-optiques empêchent la petite quantité de lumière réfléchie sur la cible ou sur certaines surfaces optiques d'être réamplifiée en retour. Une telle structure, qui a fait ses preuves, a l'inconvénient de comporter un nombre élevé de composants différents et d'avoir un faible rendement : moins de un pour 1 000 dans le laser *Phébus*.

Le laser *Mégajoules*, lui, comportera 240 faisceaux de section carrée, constante sur toute la longueur de la section d'amplification. Ces faisceaux seront regroupés par huit, dans 30 cylindres convergeant vers la chambre ; ce regroupement des faisceaux, qui a déjà été testé dans des maquettes, permet de réaliser des boîtes de lumière plus efficaces, où la lumière des lampes flash qui excitent les atomes de néodyme sera mieux utilisée, augmentant ainsi l'un des facteurs de rendement total.

Deuxièmement, chaque faisceau délivrera une énergie de près de 20 kilojoules, à une longueur d'onde de 1,05 micromètre, contre 10 kilojoules pour *Phébus*, à surface égale. L'impulsion sera plus longue, et les couches minces, réalisées par un procédé sol-gel (on dépose sur le verre un gel qui contient les atomes optiquement actifs, puis on évapore le solvant), résisteront mieux aux densités d'énergie élevées.

Troisièmement, au lieu de passer une seule fois dans plusieurs amplificateurs successifs, chaque faisceau passera quatre fois dans le même. C'est la première fois que cette technique du multipassage est employée, dans un ensemble aussi important. Le rendement est augmenté, en raison d'une meilleure récupération de l'énergie, lorsque les atomes de néodyme excités reviennent dans leur état fondamental.

Globalement le rendement du laser *Mégajoules* devrait être 10 à 20 fois supérieur à celui de *Phébus*, avec une conception qui réduit le nombre de types de composants ; chacun d'eux pourra donc être produit en série, à un coût unitaire réduit.

La chambre d'expérience sera une enceinte où l'on aura fait le vide ; y sera disposée, au centre exact, la cible, sur laquelle seront focalisés les 240 faisceaux du laser. C'est la chambre qui supportera l'ensemble des moyens de mesure, qui diagnostiqueront son fonctionnement, et c'est elle qui contiendra tous les effets de la fusion thermonucléaire (effets thermiques ou effets mécaniques, telle l'onde de choc qui provient de l'implosion). Pour *Phébus*, la chambre est une sphère d'aluminium de 2,3 mètres de diamètre, avec des parois de 12 centimètres d'épaisseur ; pour le laser *Mégajoules*, une telle chambre serait insuffisante. Les physiciens du CEA étudient, avec le concours d'industriels, une chambre sensiblement sphérique de dix mètres de diamètre, avec un diamètre intérieur assez grand pour éviter la vaporisation de la surface interne sous l'action des rayons X dégagés par la fusion. L'épaisseur de sa paroi atteindra un mètre : 80 centimètres d'un matériau absorbeur de neutrons seront compris entre deux couches d'aluminium, de 10 centimètres d'épaisseur chacune. La masse totale sera supérieure à 600 tonnes !

Depuis plus de 20 ans, des équipes ont inlassablement perfectionné la fabrication des cibles et la mise au point des méthodes de diagnostic du plasma. Leur tâche est difficile, en raison de la petitesse de la cible à réaliser (entre 0,1 et 1 millimètre) et de la grande précision à obtenir : pour éviter le développement d'instabilités hydrodynamiques, par exemple, la rugosité de la surface de la capsule doit être inférieure à quelques centièmes de micromètres. La nouveauté, pour le laser *Mégajoules*, est surtout que la cible devra être maintenue à une température de –250 °C jusqu'à l'instant de l'expérience. Naturellement le dispositif de maintien en froid et de positionnement de la cible dans la chambre devra être rétracté juste avant la mise en fonctionnement du laser.

La multiplication des moyens de mesure, qui permettent un diagnostic précis de l'expérience, est une autre clé de succès. Elle est plus importante qu'avec le laser *Phébus*, parce que la fréquence des expériences sera limitée : on devra attendre la décroissance de la radioactivité induite dans la chambre avant de préparer l'installation pour un nouveau tir. Les mesures calorimétriques permettront d'établir un bilan de l'énergie, et l'on explorera les émissions du plasma dans toute la gamme X, ainsi que l'émission de neutrons, pour sonder la matière comprimée. Pour obtenir une triple résolution spectrale, spatiale et tem-

porelle, avec une toute petite cible et des émissions qui durent quelques nanosecondes, des systèmes spécialement conçus s'imposent. L'acquisition des données devra être automatique, comme elle l'est déjà pour *Phébus* ; leur transposition au laser *Mégajoules* posera surtout le problème du «durcissement» des systèmes à toutes les sources de bruit dues aux rayonnements intenses provoqués par les réactions de fusion.

Le laser *Mégajoules* constitue un élément clé du programme de simulation destiné à maintenir une capacité de dissuasion nucléaire, après l'arrêt définitif des essais, décidé en 1996. Après le laser *Phébus*, en exploitation depuis dix ans, il provoquera des réactions de fusion, en concentrant dans un temps très bref une forte quantité d'énergie sur une microcible. Les dimensions millimétriques de cette dernière ne sont en rien comparables à celles d'un engin nucléaire, mais les valeurs obtenues par certains paramètres (température et densité) sont dans la gamme intéressante pour la compréhension des phénomènes caractéristiques du domaine thermonucléaire. Le laser *Mégajoules* fera aussi progresser l'ensemble de la physique des plasmas denses, présents aussi bien dans l'espace que dans des futures centrales de production d'énergie civile. Sa construction est échelonnée dans le temps : la première étape est la construction de la ligne d'intégration laser, entreprise dès 1996.

Jacques COUTANT a dirigé, de 1986 à 1995, le Département Laser et physique du plasma, au Centre CEA de Limeil-Valenton.

La fusion thermonucléaire inertielle par laser (5 volumes), édité sous la direction de Robert Dautray et de Jean-Paul Watteau, Collection CEA, Éditions Eyrolles, 1993.

Energy from inertial fusion, document édité par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, Vienne, 1995

Les déchets nucléaires, sous la direction de René Turlay. Dossier scientifique de la Société française de physique, 1997.

Nuclear Fusion by Inertial Confinement, sous la direction de G. Velarde, Y. Ronen et J. Martinez-Val. CRC Press, 1993.

Chocs, revue scientifique et technique de la Direction des applications militaires, n°13, avril 1995.

LA FORMATION CONTINUE DE L'X
COLLEGE de POLYTECHNIQUE

Les avancées scientifiques

Avec l'École Polytechnique, une mise en commun des expériences, source de réflexions, riche d'échanges et de rencontres

	Décembre
Modélisation numérique des écoulements fluides non newtoniens	3, 4, 5
Migration vers l'objet et réutilisation des composants logiciels	10
Caractérisation des matériaux par ellipsométrie	11,12
Approche probabiliste de la fatigue : ponts métalliques et mixtes	18,19
Analyse quantitative, non destructive par la RMN	19

	Janvier- Février
Recherche amont dans le secteur de la Défense	8, 9
Principes et application des réseaux neuronaux	12, 13
Robotique et apprentissage	14, 15
Les lasers mégajoules	15
Thérapie génique et maladies du sang	16
Applications industrielles des lasers de puissance	20
Pour les systèmes multicapteurs, la fusion de données	26, 27 jan. et 2, 3 fév.
Microscopie et analyse à l'échelle nanométrique	29, 30

	Mars
Modélisation numérique des écoulements fluides	4, 5, 6
Les entrepôts de données : pourquoi, comment, avec quelles données?	5
Les gels : formation, structure et propriétés	10
Calcul des pièces métalliques à la fatigue	11, 12, 13
Calcul formel : possibilités et applications	12
Transformée en ondelettes : ses applications	16, 17
Génération et mise en forme des solides divisés	18, 19, 20
Modélisation en acoustique et électromagnétisme	23, 24, 25
L'électronique de demain	25, 26, 27
Internet, Intranet, commerce électronique : qu'en est-il de la sécurité?	31

Le Collège propose des séminaires conçus pour des ingénieurs et scientifiques sur tout l'environnement des sciences et des techniques, de la R&D, par exemple :
la mémoire d'entreprise, le transfert de technologie, l'intelligence économique, la veille technologique, les estimations paramétriques des projets, le commerce électronique, la négociation, l'animation et la cohésion des équipes techniques...

Le Collège conçoit, propose et organise également des séminaires et des cycles de conférences pour répondre à une demande d'entreprises.

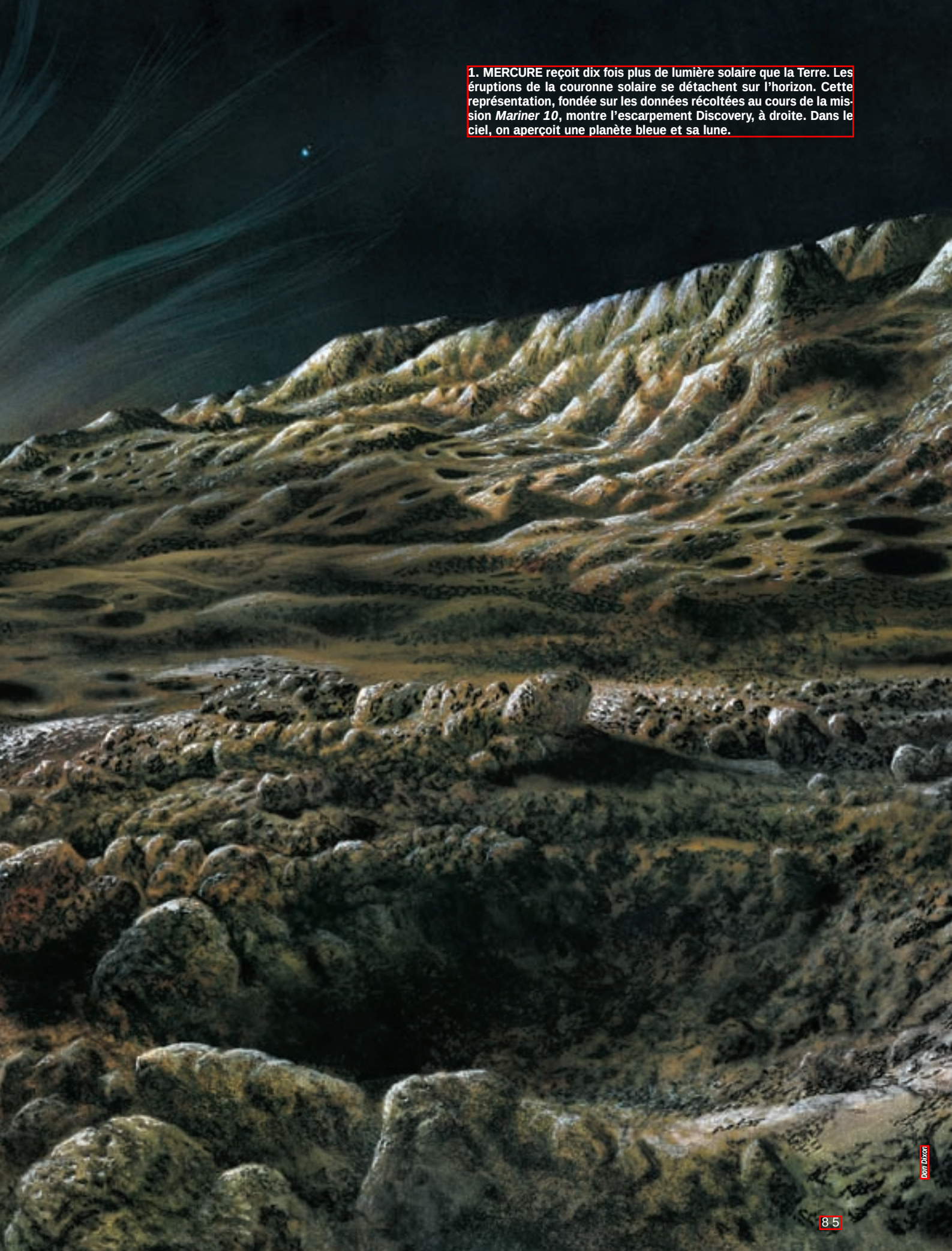
Catalogue disponible sur demande

Collège de Polytechnique
CNIT - BP 230
2, place de la Défense
92503 PARIS LA DÉFENSE
Tél : 01 46 92 21 49 - Fax : 01 46 92 21 60
e.mail : collegex@poly.polytechnique.fr
Ecole polytechnique http : //www.polytechnique.fr

Mercure, la planète oubliée

ROBERT NELSON

Malgré sa proximité, ce monde étrange nous est presque inconnu.



1. MERCURE reçoit dix fois plus de lumière solaire que la Terre. Les éruptions de la couronne solaire se détachent sur l'horizon. Cette représentation, fondée sur les données récoltées au cours de la mission *Mariner 10*, montre l'escarpement Discovery, à droite. Dans le ciel, on aperçoit une planète bleue et sa lune.

Don Dixon

Mercure, la planète la plus proche du Soleil, est un monde d'extrêmes. De tous les objets du Système solaire, c'est celui qui s'est condensé à la température la plus élevée à partir de la nébuleuse primitive. Sur Mercure, un cycle diurne dure plus de 176 jours terrestres : c'est le jour le plus long du Système solaire (il correspond à deux années mercuriennes). Quand la planète est à son périhélie (le point de l'orbite le plus proche du Soleil), elle se déplace si rapidement qu'une personne y contemplant le Soleil aurait l'impression qu'il est arrêté dans le ciel : la vitesse de rotation de Mercure sur elle-même devient égale à sa vitesse de révolution autour du Soleil. Pendant la journée, la température au sol atteint 430 °C : sur aucune autre planète, on ne mesure une telle température, bien supérieure à la température de fusion du plomb. La nuit, en revanche, la température descend à -173 °C : le krypton y serait solide.

Ces particularités excitent la curiosité des astronomes, parce qu'elles semblent difficilement compatibles avec les théories de l'évolution du Système solaire. Mercure est un bon test pour les théories astronomiques. Bien que cette planète soit, après Mars et Vénus, la plus proche de la Terre, seule la lointaine Pluton est moins bien connue. L'origine de Mercure, son évolution, son étonnant champ magnétique, son atmosphère ténue, son éventuel noyau liquide et sa densité anormalement élevée : toutes ces caractéristiques sont des énigmes.

Mercure brille intensément, mais les premiers astronomes ne distinguaient aucun détail à sa surface. Ils devaient se contenter de relever son mouvement dans le ciel. Vue de la Terre, Mercure ne s'écarte jamais de plus de 27 degrés du Soleil (c'est l'angle des aiguilles d'une montre, quand il est une heure) : on peut l'observer durant la journée, mais l'observation est perturbée par la lumière du Soleil diffusée par l'atmosphère terrestre. On peut aussi l'observer avant le lever ou après le coucher du Soleil, quand l'astre est juste derrière l'horizon ; toutefois, au crépuscule, Mercure est très bas sur l'horizon, de sorte que sa lumière traverse des couches d'air turbulent dix fois plus épaisses qu'au cours d'une observation directe, quand la planète est au zénith. Avec les meilleurs télescopes terrestres, seuls les accidents du relief qui s'étendent sur plusieurs centaines de kilomètres sont visibles (alors qu'on distingue le relief lunaire à l'œil nu).

Une journée de deux ans

Malgré les difficultés, l'observation au télescope a fourni quelques résultats intéressants. En 1955, des astronomes ont émis des ondes radar vers la surface de Mercure et enregistré les échos ; en mesurant le décalage Doppler des fréquences des ondes réémises, ils ont découvert que la période de rotation de la planète sur elle-même est égale à 59 jours terrestres (l'effet Doppler se perçoit quand on croise une ambulance : on entend une variation de la hauteur du son). Des observations antérieures indiquaient que la période de rotation était égale à 88 jours, ce qui correspond en fait à une révolution complète de Mercure autour du Soleil ; en fait, bien que la durée de la rotation soit égale à 59 jours, il faut 176 jours pour qu'un point de la surface de Mercure se retrouve exactement dans la même position par rapport au Soleil.

Si la période de rotation était égale à la période de révolution, la planète aurait toujours la même face exposée au Soleil. Toutefois, le rapport entre une année et une journée de Mercure est égal à deux tiers. Mercure, qui jadis tournait beaucoup plus vite qu'aujourd'hui, dissipait probablement de l'énergie par effet de marée (les corps célestes se boursouflent selon l'axe du corps qui les attire) ; elle a alors ralenti, et le rapport entre la durée d'une journée et celle d'une année s'est figé à la valeur mesurée aujourd'hui.

Les nouveaux observatoires spatiaux, tel le télescope spatial *Hubble*, semblent être des outils de choix pour l'étude de Mercure, car les observations ne sont pas perturbées par les mouvements de l'atmosphère. Malheureusement, ni *Hubble*, ni la plupart des autres sondes spatiales ne peuvent pointer en direction de Mercure, car la

Mercure est la planète la plus proche du Soleil. Son orbite est excentrique et inclinée par rapport au plan de l'écliptique (le plan de rotation de la Terre). Elle fait une révolution autour du Soleil en 88 jours terrestres. Comme elle tourne très lentement sur son axe, une journée de Mercure (176 jours terrestres) s'étend sur deux années de la planète. En raison de la proximité du Soleil et de la durée d'une journée, Mercure a la température diurne la plus élevée du Système solaire.

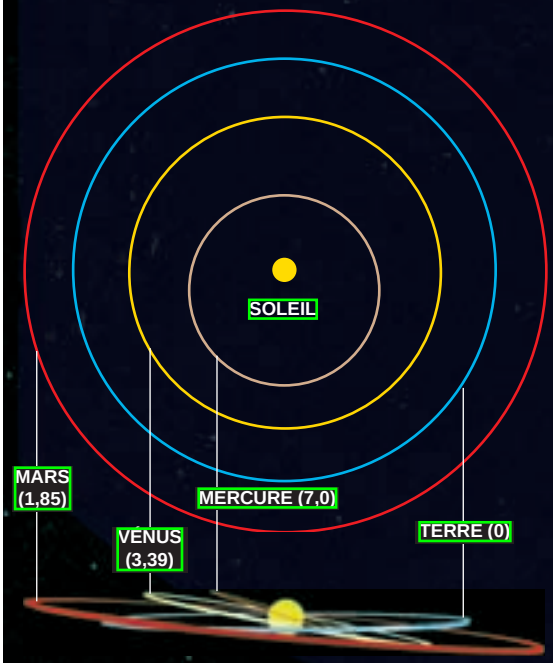
La planète, un peu plus grosse que la Lune, a une surface rocheuse parsemée de cratères. Elle est exceptionnellement dense, car son noyau est en fer. Elle a un champ magnétique intense : son noyau serait partiellement liquide. On s'interroge sur l'origine de la petite planète, car elle aurait dû refroidir suffisamment pour être entièrement solidifiée depuis longtemps.

Le champ magnétique de Mercure forme une magnétosphère qui protège partiellement la surface de l'intense vent de protons émis par le Soleil. Son atmosphère ténue est constituée de particules recyclées par le vent solaire ou éjectées de la surface.

Malgré toutes les questions que pose encore cette planète, un seul vaisseau spatial, *Mariner 10*, est allé explorer Mercure.

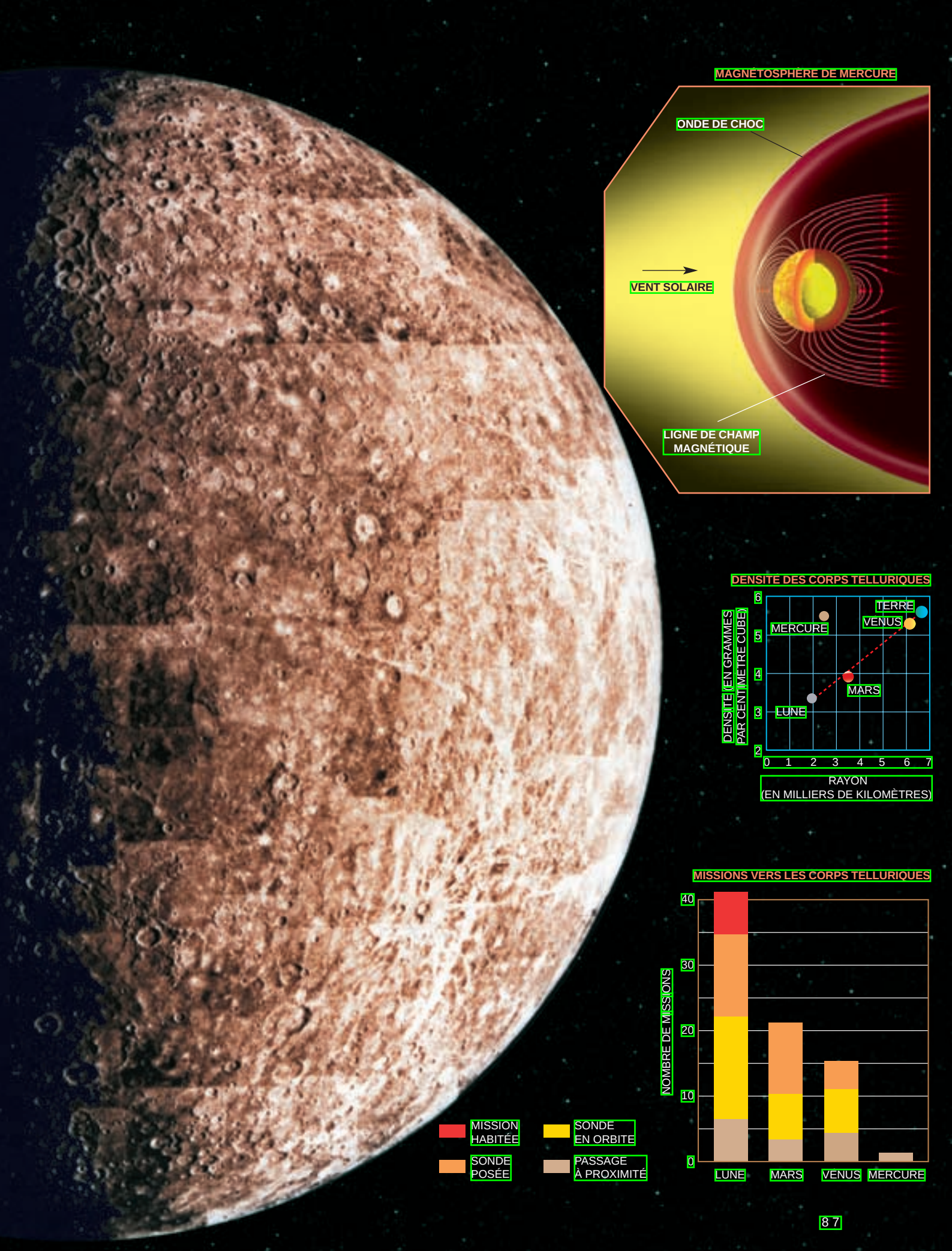
TAILLES RELATIVES DES CORPS TELLURIQUES

ORBITES RELATIVES DES CORPS TELLURIQUES
(Inclinaison en degrés du plan de leur orbite)



Photographie NASA | Dessins | Slim Films

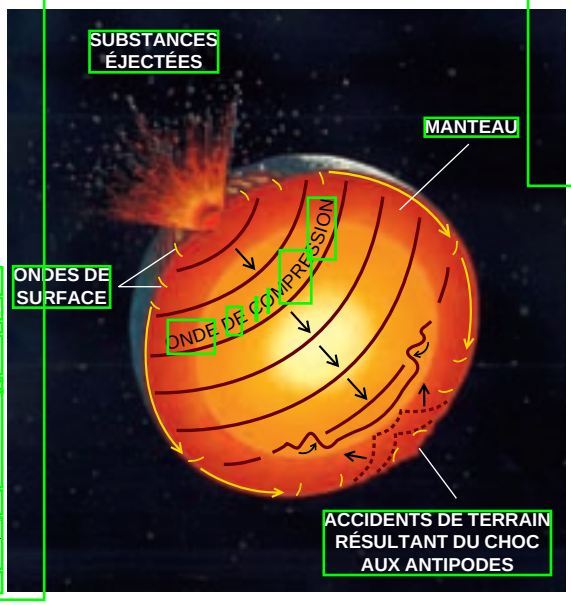
© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997


MAGNÉTOSPHÈRE DE MERCURE
ONDE DE CHOC
VENT SOLAIRE
LIGNE DE CHAMP MAGNÉTIQUE
DENSITÉ DES CORPS TELLURIQUES
DENSITÉ (EN GRAMMES PAR CENTIMÈTRE CUBE)
6
5
4
3
2
TERRE
VENUS
MERCURE
MARS
LUNE
0 1 2 3 4 5 6 7
RAYON (EN MILLIERS DE KILOMÈTRES)
MISSIONS VERS LES CORPS TELLURIQUES
NOMBRE DE MISSIONS
40
30
20
10
0
LUNE
MARS
VÉNUS
MERCURE
MISSION HABITÉE
SONDE EN ORBITE
SONDE POSÉE
PASSAGE À PROXIMITÉ

lumière du Soleil, trop proche, risquerait d'endommager les instruments d'optique, très sensibles, embarqués à bord.

Pour percer les secrets de Mercure, il n'y avait qu'une solution : l'envoi d'une sonde spatiale qui passerait à proximité. Un seul engin a fait le voyage : *Mariner 10*, qui explorait le Système solaire, dans les années 1970. Le calcul de la trajectoire de la sonde a été difficile, car il a d'abord fallu que la sonde passe à proximité de Vénus, qu'elle utilise l'attraction gravitationnelle de cette planète pour infléchir sa trajectoire et qu'elle perde de l'énergie ; la modification de la taille de l'orbite de *Mariner 10* a permis à la sonde de se rapprocher suffisamment de Mercure. Trois fois l'orbite de *Mariner 10* a frôlé Mercure : le 29 mars 1974, le 21 septembre 1974 et le 16 mars 1975. La sonde a photographié près de 40 pour cent de la surface de la planète, révélant de nombreux cratères, qui ressemblent à ceux de la Lune.

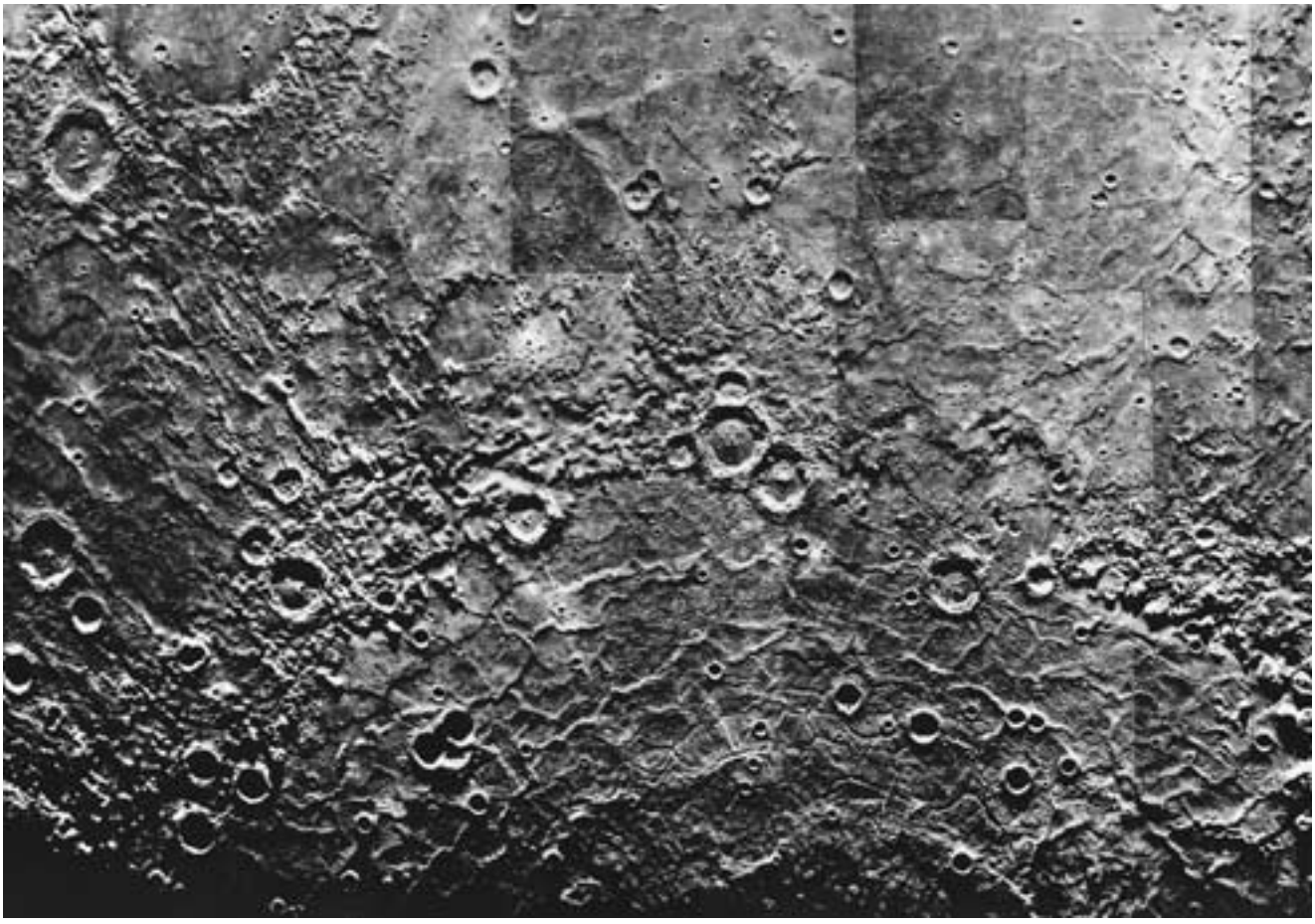
Ces photographies ont donné l'image trompeuse d'une planète qui n'aurait différé de la Lune que par sa localisation ; aussi fut-elle la planète oubliée du programme spatial américain. Plus de 40 sondes ont été envoyées vers la Lune, 20 vers Vénus et plus de 15 vers Mars. D'ici l'an 2010, plusieurs vaisseaux spatiaux seront mis en orbite autour de Vénus, de Mars, de Jupiter et de Saturne, transmettant des données précises sur ces planètes et sur leur environnement, que les astronomes mettront des années à dépouiller. Mercure ne sera guère explorée.



A.T. Kamajian, avec l'autorisation de P.H. Schultz et D.E. Gault

La question du fer

La quasi-totalité des informations dont nous disposons aujourd'hui sur Mercure vient de la mission Mariner. Les instruments embarqués ont transmis quelque 2 000 images, avec une résolution de l'ordre de 1,5 kilomètre, comparable à celle des photographies de la Lune obtenues de la Terre avec un télescope puissant. Malheureusement, seule



NASA

2. LE BASSIN CALORIS a été creusé par un énorme corps qui a heurté Mercure il y a environ 3,6 milliards d'années. Les ondes de choc se sont propagées dans la planète, créant des escarpements et des accidents de terrain aux antipodes de l'impact. Autour du bassin Caloris, les ondes concentriques de déformation se sont solidifiées après l'impact. Le centre du cratère (1 300 kilomètres de diamètre) a été aplani par les laves qui se sont déversées après l'impact, puis solidifiées. Depuis, d'autres cratères plus petits s'y sont formés.

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

une des faces de Mercure a été photographiée. L'autre reste inconnue.

En mesurant l'accélération de *Mariner 10* dans le champ gravitationnel intense de Mercure, les astronomes ont confirmé que sa densité est anormalement élevée. Les autres corps planétaires telluriques (non gazeux), tels que Vénus, la Lune, Mars ou la Terre, ont une densité proportionnelle à leur taille. Les plus grands, la Terre et Vénus, sont denses ; les autres, plus petits, tels que la Lune et Mars ont des densités inférieures. Mercure n'est guère plus grosse que la Lune, mais sa densité est proche de celle de la Terre.

Cette observation renseigne sur la composition de Mercure. Les couches externes de la Terre sont constituées de matériaux légers, de silicates, par exemple. La densité augmente avec la profondeur, car les roches, comprimées par les couches supérieures, ont une composition différente. Les noyaux denses des planètes telluriques sont essentiellement constitués de fer.

Proportionnellement, Mercure a sans doute le noyau métallique le plus volumineux de toutes les planètes telluriques. Cette caractéristique a alimenté des débats animés sur l'origine et l'évolution du Système solaire. Si l'on admet que toutes les planètes se sont formées quasi simultanément à partir de la nébuleuse primitive, on peut proposer trois hypothèses pour expliquer les caractéristiques de Mercure : soit la nébuleuse primitive avait eu une composition différente au voisinage de la trajectoire de Mercure (la différence aurait été bien supérieure à celle prévue par les modèles) ; soit le rayonnement émis par le Soleil était si intense, au début du Système solaire, que les éléments les plus volatiles et les plus légers de Mercure ont été vaporisés et éliminés ; soit, enfin, un objet massif a heurté la planète tout juste formée, et les matériaux les moins denses ont été vaporisés. Les preuves sont encore insuffisantes pour valider l'une de ces trois hypothèses.

De surcroît, ni les données transmises par *Mariner 10*, ni les observations spectroscopiques faites de la Terre n'ont permis aux astronomes de détecter ne serait-ce que des traces de fer dans la croûte rocheuse de Mercure. Pourquoi cette absence en surface, alors qu'on en trouve à la surface de la Lune et de Mars? Mercure serait-elle la seule planète du Système solaire où le fer serait en totalité concentré à l'intérieur,

3. AUX ANTIPODES DE CALORIS, le relief est chaotique ; les collines et les fractures résultent de l'impact qui s'est produit sur l'autre face de la planète. Le cratère Pétrarque *(au centre)* résulte d'un impact beaucoup plus récent, comme en témoignent les rares petits cratères qui parsèment le centre lisse. Toutefois, cette collision fut assez violente pour faire fondre la roche, qui s'est écoulée sur près de 100 kilomètres et s'est déversée dans un cratère voisin.

la croûte ne contenant que des silicates légers? Certains planétologues supposent que Mercure est resté à l'état fondu si longtemps que les substances denses se sont regroupées au centre (tout comme le fer liquide s'accumule sous le laitier dans un haut fourneau).

La sonde *Mariner 10* a révélé que Mercure a un champ magnétique intense, le plus puissant des planètes telluriques après la Terre. Le champ magnétique terrestre est engendré par les métaux conducteurs en fusion, qui circulent dans le noyau, produisant un effet dynamo auto-entretenu. Si le champ magnétique de Mercure a la même origine, la planète a un noyau partiellement liquide.

Cette hypothèse soulève une difficulté : de petits objets tels que Mercure, ont une grande surface par rapport à leur volume, de sorte qu'ils dissipent plus vite leur énergie vers l'espace. Si Mercure avait un noyau en fer pur, comme sa densité et son champ magnétique l'indiquent, son noyau devrait être froid et solidifié depuis longtemps. Toutefois, un noyau solide ne peut produire un effet dynamo auto-entretenu.

Une histoire fracturée

On en déduit que le noyau contient d'autres matériaux qui abaissent le point de solidification du fer, de sorte que cet élément reste liquide même à une température relativement basse. C'est la base de théories récentes que les planétologues cherchent à tester : le noyau de Mercure contiendrait du fer solide entouré d'un mélange de fer et de soufre liquide, à une température de 1 000 °C.

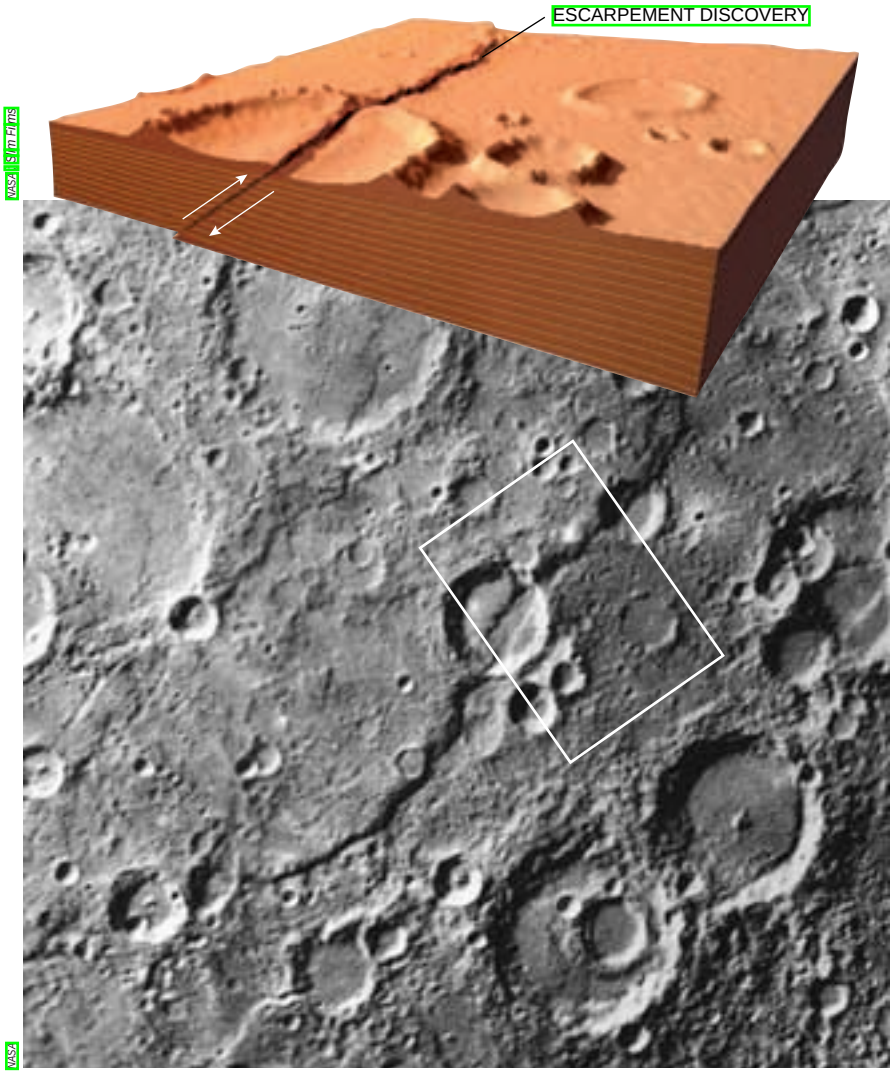
Quand une surface planétaire est suffisamment solidifiée, elle se déforme quand une contrainte lui est appliquée pendant longtemps, ou elle casse comme du verre en cas de choc. Après sa formation, il y a quelque quatre milliards d'années, Mercure a été bom-

bardée par d'énormes météorites qui ont brisé sa fragile enveloppe externe, libérant des torrents de lave. D'autres collisions moins violentes et plus récentes ont aussi libéré des coulées de lave. Ces chocs ont peut-être libéré suffisamment d'énergie pour faire fondre la surface ou pour atteindre les couches profondes liquides, provoquant un épanchement en surface des fluides sous-jacents. La surface de Mercure témoigne d'événements postérieurs à la solidification de la couche externe de la planète.

Les géologues planétaires ont tenté de décrire l'histoire de Mercure d'après ces indices, mais sans connaître précisément la composition des roches de la surface. La seule méthode qui permettrait de connaître l'âge absolu de la planète serait la datation d'échantillons rapportés sur Terre... mais on n'en a aucun. Aussi doit-on estimer des âges relatifs, fondés sur le principe des superpositions : les accidents de terrain les plus récents recouvrent les plus anciens. Ce principe sert notamment à la datation relative des cratères.

À la surface de Mercure, plusieurs grands cratères sont entourés d'anneaux concentriques de collines et de vallées. Ces bassins représentent vraisemblablement des impacts de météorites qui ont engendré des ondes de choc (comme une pierre jetée dans une mare), lesquelles se sont solidifiées sur place. Caloris, avec ses 1 300 kilomètres de diamètre, est le plus grand de ces bassins. L'impact qui l'a créé a formé un bassin que les laves ont rempli, créant une surface plane où d'autres cratères plus petits se sont ultérieurement formés. Caloris s'est vraisemblablement formé il y a 3,6 milliards d'années. La collision a été si violente que la surface de Mercure, aux antipodes de Caloris, a été bouleversée : elle est sillonnée de failles.

La surface de Mercure est aussi traversée de reliefs linéaires, surtout orientés Nord / Sud, Nord-Est / Sud-Ouest et Nord-Ouest / Sud-Est. Comment ces reliefs connus sous le nom de grille tectonique de Mercure sont-ils apparus ? Certains astronomes ont supposé que la croûte s'est solidifiée quand la planète tournait beaucoup plus vite sur elle-même (une journée équivalait peut-être à 20 heures). En raison de la vitesse de la rotation, la planète avait initialement un renflement à l'équateur, mais elle aurait pris une forme plus sphérique en ralentissant. Les reliefs linéaires seraient apparus au moment de ce changement de forme (avant le cratère Caloris, car ils ont été effacés par la météorite) : ils seraient dus à cette déformation et aussi à la contraction résultant de la solidification de la planète quand elle a ralenti. Le rétrécissement de la surface de la planète, d'environ un million de kilomètres carrés, aurait formé les failles et les escarpements incurvés qui s'entrecroisent sur la surface de Mercure.



4. L'ESCARPEMENT DISCOVERY *(vu en coupe sur le schéma et de dessus sur la photographie)* s'étend sur 500 kilomètres ; par endroits, son altitude atteint 2 000 mètres. C'est l'une des nombreuses failles de compression qui sillonnent la surface de Mercure. Ces failles ont vraisemblablement été créées quand certaines parties du noyau de Mercure se sont solidifiées : la surface de la planète diminuant à mesure que la croûte se solidifiait, cette dernière a été comprimée. Par endroits, la croûte comprimée s'est rompue, et un fragment a glissé au-dessus du fragment adjacent, faisant apparaître une faille de compression.

Une atmosphère ténue

Sur la Terre, l'érosion a lissé les reliefs, tandis que les cratères sont restés presque intacts à la surface de Mercure, de Mars et de la Lune. Sur ces trois corps, les proportions des divers cratères en fonction de leur taille sont analogues, mais les cratères de Mercure sont un peu plus gros : les objets qui ont heurté cette planète étaient sans doute plus rapides, en raison de leur orbite elliptique proche du Soleil. Ainsi, ces météorites provenaient sans doute toutes de la ceinture d'astéroïdes. Au contraire, la répartition des cratères des satellites de Jupiter en fonction de leur taille est différente : ces satellites ont été heurtés par des objets qui ne provenaient pas de la ceinture d'astéroïdes.

Le champ magnétique de Mercure est suffisamment intense pour piéger des particules chargées, tels les protons éjectés du Soleil et qui forment le vent solaire. Le champ magnétique

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

forme un écran, comme la magnétosphère qui entoure la Terre, mais plus petit. Les magnétosphères évoluent sans cesse au gré de l'activité du Soleil : en raison de sa petite taille, le bouclier magnétique de Mercure peut changer beaucoup plus vite que celui de la Terre ; il réagit rapidement aux modifications du vent solaire, dix fois plus dense près de Mercure que près de la Terre.

Un violent vent solaire bombarde sans cesse la face éclairée de Mercure. Le champ magnétique est tout juste suffisant pour éviter que le vent n'atteigne la surface de la planète, sauf quand le Soleil est particulièrement actif ou quand Mercure est au périhélie. Alors, le vent solaire balaie la surface, et ses protons arrachent des atomes à la croûte, qui sont piégés par la magnétosphère.

Toutefois, des objets aussi chauds et aussi petits que Mercure n'ont presque pas d'atmosphère, car les molécules de gaz ont des vitesses supérieures à celle qui leur permet d'échapper à l'attraction de la planète. Sur Mercure, tout matériau volatil finit par se perdre dans l'espace, au point qu'on a même longtemps pensé que Mercure était totalement dépourvue d'atmosphère. C'était une erreur : les spectromètres ultraviolets de *Mariner 10* ont détecté de petites quantités d'hydrogène, d'hélium et d'oxygène, tandis que d'autres observations, faites de la Terre, ont révélé des traces de sodium et de potassium.

L'origine de ces constituants et leur destinée restent sujets à controverse. Contrairement à l'atmosphère terrestre, celle de Mercure s'évapore et se reconstitue sans cesse. Elle semble surtout résulter de l'action, directe ou indirecte, du vent solaire, bien que quelques constituants proviennent peut-être de la magnétosphère ou de comètes. Quand un atome est éjecté de la surface par le vent solaire, il s'ajoute à la mince atmosphère. La planète elle-même libère peut-être encore ses dernières substances volatiles primordiales emprisonnées dans la croûte.

Récemment, une équipe d'astronomes de Pasadena a observé la polarisation circulaire d'un faisceau radar réfléchi près les pôles de Mercure : les résultats ont révélé la présence de glace. Comment des calottes glaciaires ou toute autre forme d'eau peuvent-elles exister sur une planète aussi chaude que Mercure ? Peut-être la glace – vestige de l'eau primordiale qui s'est condensée au moment de la formation de la planète – est-elle toujours dans des zones d'ombre situées près des pôles ?

Si tel est le cas, on doit conclure que l'orientation de Mercure n'a pas changé depuis la formation du Système solaire, n'exposant jamais un de ses pôles au Soleil, malgré des événements aussi dévastateurs que la formation du cratère Caloris. Une telle stabilité serait étonnante. Une autre possibilité serait que des comètes, tombant sans cesse sur Mercure, y apportent de l'eau. La glace aux pôles resterait dans l'ombre, s'évaporant lentement, et elle serait à l'origine de l'hydrogène et de l'oxygène présents dans l'atmosphère de Mercure. Enfin, d'autres astronomes pensent que les régions polaires à l'ombre contiendraient d'autres substances volatiles, tel le soufre, qui réémettraient les faisceaux radar comme de la glace, mais auraient un point de fusion bien supérieur à 0 °C.

Les obstacles à l'exploration

Pourquoi Mercure a-t-elle été oubliée depuis près de 25 ans d'exploration du Système solaire ? Peut-être parce que Mercure ressemble à la Lune, mais peut-être aussi parce que la NASA a nommé dans ses conseils de direction des personnes qui ont déjà participé à des missions : les experts de certains corps célestes tendent à privilégier l'exploration de ceux-ci. Mercure, peu explorée, a peu d'avocats.

Le coût des études est également une raison importante. Les dirigeants de la NASA demandent aux scientifiques de proposer des missions toujours plus rapides, plus spectaculaires et moins chères. Les objectifs doivent être précis et limités, et l'enjeu scientifique doit justifier le coût. Dans un contexte de limitations budgétaires, les seules missions lointaines sont celles du programme *Discovery*. Les scientifiques doivent s'associer avec des industriels avant de proposer des missions ; certaines sont ensuite sélectionnées et subventionnées par la NASA (jusqu'à présent, quatre de ces missions ont été décidées). D'après les objectifs du programme *Discovery*, une mission ne doit pas coûter plus de 1,3 milliard de francs. À titre de comparaison, la mission *Galileo* vers Jupi-

L'UNIVERS DES SCIENCES

LES ÉTOILES

Ce livre expose l'origine et la nature de nos connaissances sur les étoiles, avant de les décrire dans leur dynamique et leur devenir. Les objets célestes les plus insolites, géantes rouges, supernovae, pulsars et trous noirs, s'insèrent alors naturellement dans le récit de l'évolution stellaire.

272 pages - 220 F
code 1892

POUR LA SCIENCE DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p.98

ter et la mission *Cassini* vers Saturne coûteront, à elles deux, plus de six milliards de francs.

De surcroît, une mission vers Mercure pose une difficulté technique particulière : la sonde devrait être protégée contre l'intense rayonnement solaire, auquel s'ajoute l'énergie solaire réfléchie par la planète (ce rayonnement pourrait même être encore plus dommageable que le rayonnement direct du Soleil). Malgré toutes ces difficultés, un projet de mission vers Mercure a été soumis en 1994 et deux en 1996.

Le projet de 1994, *Hermès 94*, aurait utilisé un dispositif de propulsion à l'hydrazine nécessitant plus d'une tonne de carburant. La plus grande partie du combustible aurait permis au vaisseau spatial de réduire la taille de l'orbite. Nous n'aurions pu éliminer la charge de carburant qu'en multipliant les rencontres avec d'autres planètes, ce qui aurait ralenti le vaisseau. Ces détours auraient allongé le trajet, qui doit être le plus court possible, car les rayons cosmiques endommagent les instruments embarqués, dont la durée de vie est ainsi limitée. Nous nous proposions de photographier toute la surface de Mercure avec une résolution inférieure à un kilomètre. Nous voulions ensuite relier ces cartes topographiques avec des cartes du champ gravitationnel et du champ magnétique. Finalement, la NASA rejeta le projet en raison de son coût élevé et des risques d'échec.

En 1996, une autre équipe proposa un nouveau projet moins coûteux et plus bref. La quantité de carburant n'aurait pas excédé 300 kilogrammes, car le vaisseau aurait été équipé d'un moteur à propulsion ionique. Ce moteur d'un type nouveau aurait utilisé l'énergie solaire pour ioniser des atomes de xénon et pour accélérer les ions à l'aide d'un champ électrique. La mission *Hermès 96* aurait atteint Mercure une année avant *Hermès 94*. Pourtant, la NASA n'a pas retenu le projet, car elle a jugé que le moteur solaire était encore trop expérimental.

La NASA s'est aussi intéressée à un troisième projet, *Messenger*, soumis dans le cadre des missions *Discovery*. Le vaisseau, conçu par des ingénieurs du Laboratoire de physique appliquée du Maryland, aurait été équipé d'un moteur à propulsion classique. Deux instruments auraient déterminé les proportions des éléments les plus abondants de la croûte rocheuse. Toutefois, la charge supplémentaire due à ces deux instruments aurait imposé d'allonger le trajet : le vaisseau spatial aurait dû passer deux fois à proximité de Vénus et trois fois à proximité de Mercure, avant de se mettre en orbite. Le trajet Terre-Mercure aurait duré plus de quatre ans, le double de ce qui était prévu pour *Hermès 96*. *Messenger* aurait aussi été la mission *Discovery* la plus onéreuse des derniers projets qui ont été évalués (elle a été estimée à 1,2 milliard de francs). C'est vraisemblablement en raison de son coût que le projet n'a pas été sélectionné.

Les personnes qui décident des missions *Discovery* prennent des avis de spécialistes qui ne travaillent pas tous à la NASA, et qui privilégient souvent les techniques éprouvées au détriment des innovations. Pour pallier cette insuffisance, la NASA a décidé de créer un nouveau programme qui s'intéresse exclusivement aux projets futuristes. Ainsi une des missions doit évaluer dans l'espace diverses techniques innovantes qui ont été proposées. En juillet 1998, le vaisseau *Deep Space One*, propulsé par un moteur ionique, entamera un voyage de trois ans en direction de l'astéroïde McAuliffe (du nom de l'astronaute Christa McAuliffe, morte dans l'explosion de *Challenger*), de la planète Mars et de la comète West-Kohoutek-Ikamura. *Deep Space One* devra prouver l'efficacité de la propulsion ionique. Une mission à propulsion ionique vers Mercure est étudiée par l'Agence spatiale européenne pour 2008-2010. Ces missions devraient percer les mystères de la lointaine planète.

Robert NELSON travaille au Laboratoire *Jet Propulsion*, à Pasadena. Il a été l'astronome principal des projets *Hermès 94* et *Hermès 96*, et participe à la mission *Deep Space One* qui sera lancée en 1998.

Atlas of Mercury, sous la direction de M.E. Davies, D.E. Gault, S.E. Dwornik et R.G. Strom, NASA Scientific and Technical Information Office, Washington, D.C., 1978.

Mercury, sous la direction de F. Vilas, C.R. Chapman et M.S. Matthews, University of Arizona Press, 1988.

The New Solar System, sous la direction de J.K. Beatty et A. Chaikin, Cambridge University Press et Sky Publishing Corporation, 1990.

La musique des sables

FRANCO NORI • PAUL SHOLTZ • MICHAEL BRETZ

Pourquoi certains sables crissent, tandis que d'autres mugissent.

Depuis des millénaires, les Bédouins traversant les déserts redoutent les démons et les fantômes dont ils croient entendre les cris. Marco Polo, également, a cru que des esprits mauvais des déserts emplissaient l'air de musiques de toutes sortes, de roulements de tambour et de claquements de mains. Les explications modernes de la musique des sables sont plus rationnelles : ces sons proviendraient d'effondrements des dunes.

Une trentaine de dunes musicales ont été identifiées dans les déserts et sur les plages d'Afrique, d'Asie, d'Amérique du Nord et d'ailleurs. Selon les cas, ces dunes émettent des sons de cloches, de trompettes, d'orgue, de cornes de brume, de canon, d'avion volant à basse altitude, des sifflements de fils télégraphiques dans le vent ou, encore, des gémissements. Comment naissent ces sons?

Certains géologues ont cherché l'origine de la diversité des sons dans les différences de taille et de forme des grains ; d'autres ont évoqué des mécanismes d'interactions différents, mais les études ont été peu systématiques, et aucune théorie n'expliquait correctement la production de ces sons. Nos travaux ne résolvent pas complètement le problème, mais ils posent les bases d'une élucidation longtemps cherchée.

Sons et musiques

Certains sons produits par les sables n'ont rien d'énigmatique : quand on marche sur une plage, le sable crisse sous les pieds. Ce type de comportements s'observe sur toutes les plages : au bord des mers, des lacs ou des rivières du monde entier. En revanche, les sables mugissants ne se font presque exclusivement entendre qu'aux confins des déserts ou loin des rivages : ce sont eux qui ont étonné Marco Polo ou Charles Darwin.

Ceux qui les ont entendus les comparent aux sons d'instruments de musique. Parfois, ils sont émis à intervalles réguliers, tels des roulements de tambours ou de tambourins. Dans d'autres cas, ils ressemblent plus à des sons de trompettes ou de cloches. Des tonalités aussi cristallines ne se produisent que lorsque de petites quantités de sable se mettent en mouvement sous l'action d'une force qui ne crée qu'une seule fréquence. Dans le Nevada, en 1994, nous avons observé qu'une petite avalanche de sable émettait des sons similaires aux bourdonnements lents d'instruments utilisés par les aborigènes australiens.

La musique du désert

En crissant, les sables produisent des sons à des fréquences comprises entre 500 et 2 500 hertz durant moins d'un quart de seconde. Le son est composé d'un fondamental et de quatre ou cinq harmoniques. Les dunes mugissantes, d'autre part, produisent souvent des sons plus sourds, de fréquence inférieure, comprise entre 50 et 300 hertz ; ils durent généralement moins de quelques secondes, mais les plus grosses dunes émettent parfois pendant 15 minutes. Ces sons sont rarement purs : ils contiennent de nombreuses fréquences proches, mais aucun harmonique d'une fréquence fondamentale n'a jamais été observée.

Ces différences importantes ont fait conclure que les mécanismes d'émission des divers sons devaient être différents. Pourtant Peter Haff, de l'Université Duke, a fait crisser du sable de dunes mugissantes, prouvant qu'il existe un lien entre les deux phénomènes. Dans tous les cas, les sons résultent du déplacement des grains. Pour les crissements, la pression sur les grains supérieurs oblige les sables à se tasser et à se déplacer vers l'extérieur, sous les pieds. Dans le cas des dunes mugissantes, les déplacements se produisent pendant des avalanches. On doit donc élucider le mécanisme des avalanches pour comprendre la composition spectrale des mugissements émis.

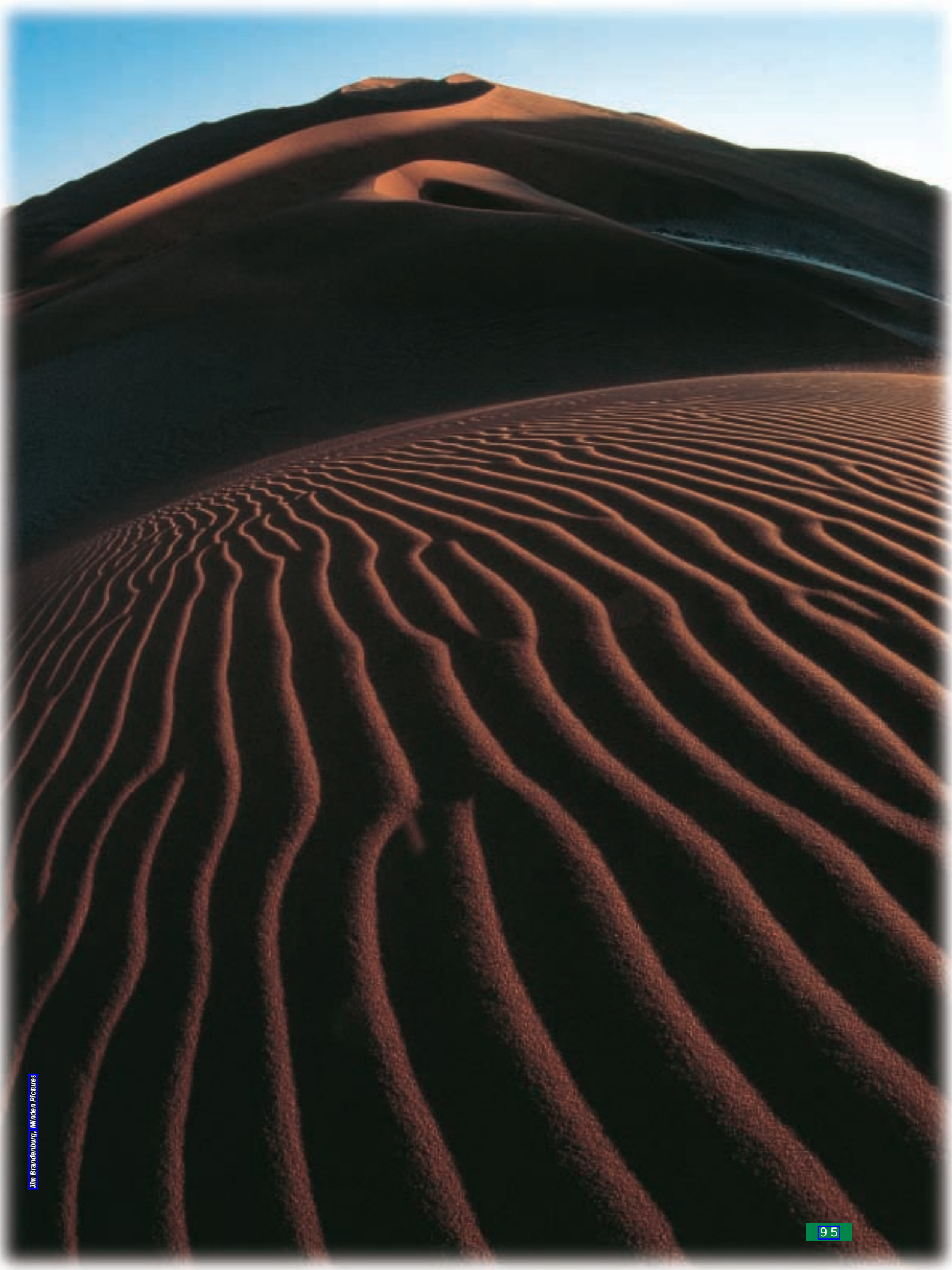
Pour qu'une avalanche se produise, le vent doit avoir donné à la dune un angle de talus égal à 35 degrés environ (pour le sable sec du désert). Lorsque cet angle est atteint, le sable du sommet est instable : les grains des couches supérieures glissent sur les grains sous-jacents, tombant dans les espaces libres, rebondissant et poursuivant leur descente. L'émission des sons résulte probablement de ce mouvement d'ensemble. Les plus grosses avalanches, où des pans entiers de sable glissent en bloc, sont les plus bruyantes. Dans certains endroits, lorsque beaucoup de sable glisse, les sons sont perçus jusqu'à dix kilomètres.

Les mystères qui entourent ces vibrations sont nombreux. Tout d'abord, on comprend mal la richesse de leur composition harmonique, c'est-à-dire la raison du grand nombre des fréquences simultanément émises. Au cours des années 1970, David Criswell et ses collègues de l'Université de Houston ont trouvé que chacune des fréquences semble correspondre à un temps de descente et de rebond propre.

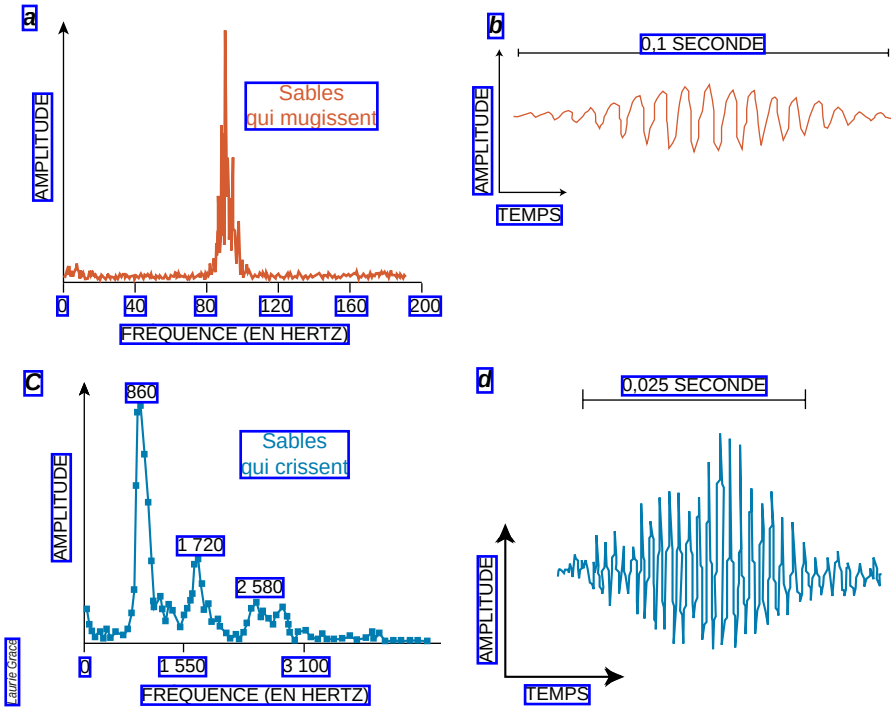
La gamme de fréquences émises dépend de nombreux facteurs. Les émissions sonores des Montagnes de sables du Nevada sont à des fréquences comprises entre 50 et 80 hertz, alors que celles de Korizo, en Libye, s'échelonnent de 50 à 100 hertz, et celles du désert du Kalahari, en Afrique du Sud, de 130 à 300 hertz. De telles émissions, probablement

1. LES DUNES DE NAMIB, en Afrique du Sud, produisent des sons qui s'entendent à des kilomètres quand se forment des avalanches.

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997



Jim Brandenburg, Minden Pictures



2. LES SONS ÉMIS PAR LES SABLES MUGISSANTS ont des fréquences proches d'une fréquence centrale *(a)* et ils durent longtemps *(b)*. Les crissements, au contraire, contiennent des harmoniques d'une fréquence fondamentale *(c)*, mais ils sont très brefs *(d)*.

dues aux divers modes de vibrations lors du mouvement des plaques de sable, sont rarement harmonieuses. Causées par le frottement de grandes quantités de sable, elles sont sourdes, voire assourdissantes, et les vibrations qui les accompagnent peuvent être si fortes qu'elles renversent un individu.

Examinons les phénomènes agissant sur les grains. La taille moyenne de ces derniers, qu'ils produisent des sons ou non, est de l'ordre de 0,3 millimètre. Habituellement les grains des dunes mugissantes sont de tailles très homogènes, en particulier au sommet de la crête, d'où le son est généralement émis. Une telle homogénéité favorise le glissement des couches de sables : si des grains de différentes tailles étaient mélangés, les petits grains viendraient entraver le mouvement des plus gros.

Toutefois, cette seule homogénéité n'explique pas toutes les émissions sonores. En Libye, dans le Korizo ou dans le Gelf Kebib, la règle semble même violée : les grains sont de tailles exceptionnellement variées. De surcroît, des dunes parfaitement silencieuses contiennent quelquefois des grains similaires aux grains de dunes sonores.

En revanche, les grains de sable des dunes mugissantes ont souvent des surfaces inhabituellement régulières, avec des défauts de taille inférieure à quelques micromètres. Ces dunes, aux confins de grandes étendues de sable, sont composées de grains qui se sont usés en roulant dans le désert sur de longues distances. De même, les grains remaniés pendant très longtemps au cours des mouvements des dunes sont érodés. Les sables qui crissent, également, sont généralement très lisses.

Un examen attentif des sables des dunes mugissantes des Montagnes de sable ou du Kalahari montre pourtant que les grains ne sont pas tous sphériques ou fortement usés. En 1936, à Pretoria, A.D. Lewis obtint des émissions sonores à partir de grains de sel de forme cubique. Inversement, on n'a pas obtenu de sons avec des billes de verre : si la régularité de la surface des grains est une condition nécessaire à l'émission de sons, une rugosité minimale demeure indispensable.

En outre, l'humidité du sable peut modifier les frottements entre les grains ou provoquer des agrégations qui bloquent les mouvements de cisaillement. Les émissions de sons se produisent dans la partie des dunes qui sèche le plus vite : bien que les précipitations soient rares dans le désert, les dunes retiennent bien l'eau, mais le sable sèche rapidement près de la surface et, notamment, près de la crête des dunes.

Dans la partie de la crête située sous le vent, la régularité des grains et l'absence d'humidité favorisent la production de sons au cours des mouvements du sable : comme le vent dépose préférentiellement ce dernier près du sommet, sur le bord versant de la dune, la pente augmente lentement jusqu'à ce qu'une avalanche se produise.

Généralement les avalanches se manifestent sous la forme du glissement de grandes plaques, qui se détachent du sommet des dunes. Dans les dunes mugissantes, ces plaques ne ralentissent pas lorsqu'elles glissent sur des pentes plus faibles, mais leur partie supérieure s'effondre et percute leur partie inférieure, comme une vague qui déferle. La rupture finale de la plaque de sable est inhabituellement turbulente.

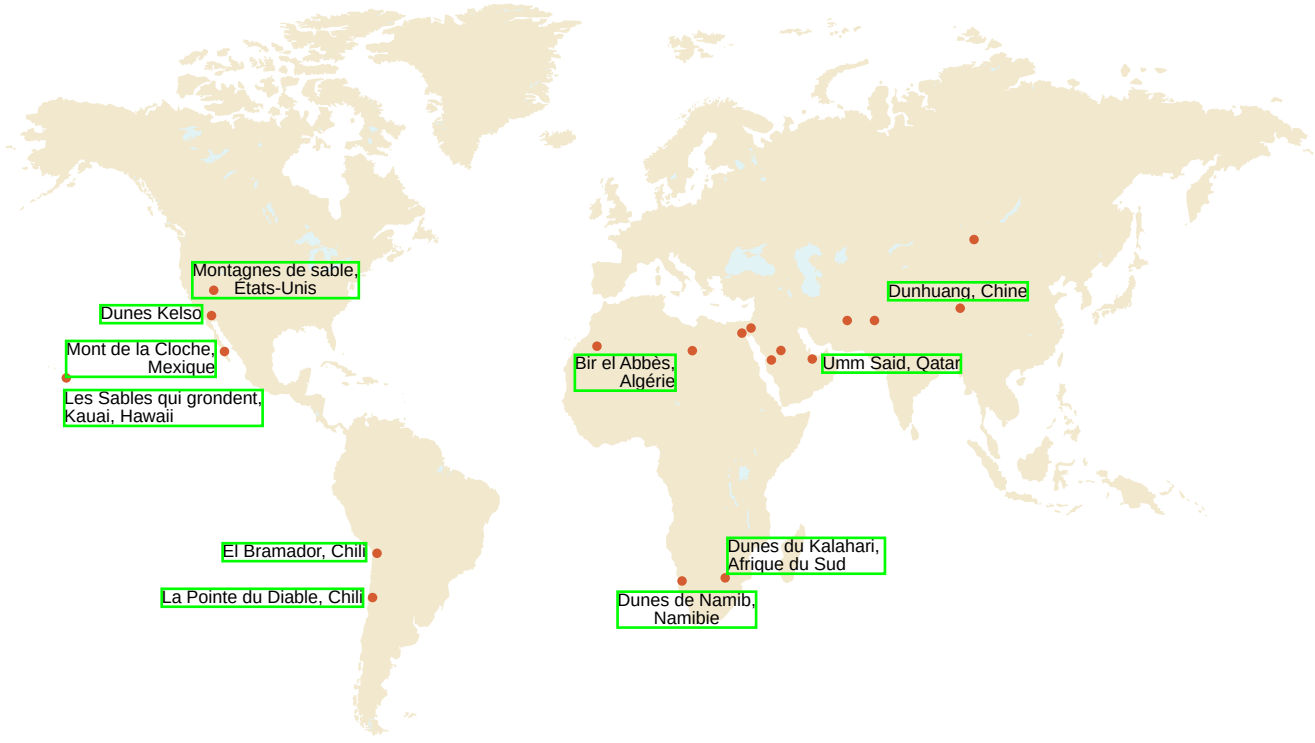
Un siècle d'études

L'étude des sables mugissants a été compliquée par la rareté du phénomène et par la difficulté de reproduire des mugissements au laboratoire. De surcroît, la confusion qui a régné pendant des années entre les crissements et les autres émissions sonores gêne la lecture des articles scientifiques anciens.

Le géologue américain Carrington Bolton publia l'une des premières études consacrées à ce phénomène en 1889 : il proposa que les émissions sonores soient dues à un mince film d'impuretés qui auraient été progressivement déposées par l'évaporation de l'eau. Les vibrations de l'air, entre les plans de cisaillement, auraient été à l'origine des émissions sonores. L'intensité et la hauteur des sons auraient été déterminés par les caractéristiques des grains. Bien qu'il se soit plus particulièrement intéressé aux crissements, C. Bolton utilisa le même modèle pour expliquer les émissions sonores des dunes mugissantes.

À la même époque, le Britannique Cecil Carus-Wilson proposa que les crissements soient dus aux frottements entre les grains. Il fut le premier à établir de manière crédible que les grains des sables mugissants étaient habituellement sphériques, très érodés et de tailles homogènes. Ces idées furent

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997



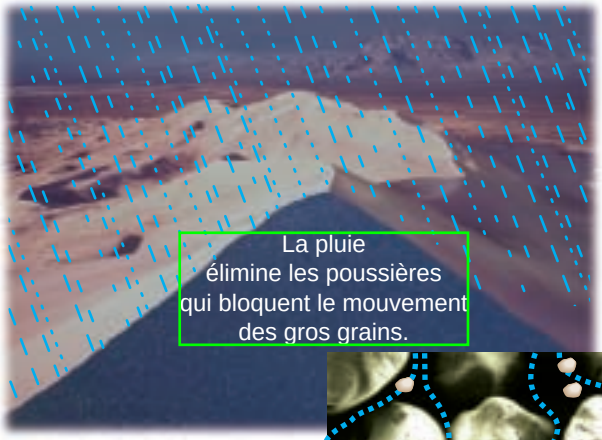
Avec l'autorisation de Michael Bratz

Terrence Moore

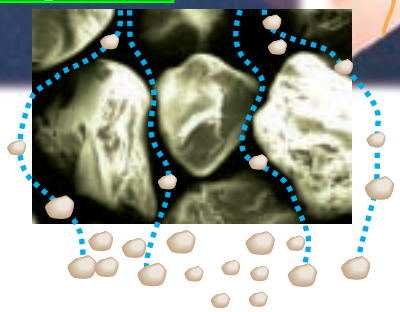
Douglas Waugh, Peter Arnold Inc.

Jim Brandenburg, Minden Pictures

2. DES SABLES MUGISSANTS ont été entendus dans l'ensemble du monde *(points rouges)*. Quelques dunes mugissantes sont représentées dans la partie inférieure de l'image.



Photographie: Terrence Moore; Dessins: Laure Grace



3. LES DUNES émettent des sons lorsque plusieurs conditions sont réunies. D'abord, des grains propres, secs et polis doivent être rassemblés au sommet de la dune. Une avalanche peut alors se produire lorsque la dune fait un angle de plus de 35 degrés environ. Les couches supérieures de sable se déplacent alors plus rapidement que les couches inférieures *(schéma a, page ci-contre)*, se décalant alternativement vers le haut et vers le bas entre les grains *(b, c, d)*. Ces mouvements répétitifs et organisés provoquent l'émission de sons.

Avec l'autorisation de: F. Nori; P. Schulz et M. Bretz

4. LES GRAINS du sable recueilli sur une plage du lac Huron, dans le Michigan, sont anguleux *(micrographie électronique de gauche)*. Les grains du sable crisseur des plages du lac Michigan sont plus lisses *(au milieu)*, tandis que le sable mugissant des Montagnes de sable (Nevada) présente des grains encore plus réguliers *(à droite)*.

a posteriori quantifiées par D. Criswell et ses collaborateurs.

Puis, en 1966, l'ingénieur britannique R.A. Bagnold publia, dans les *Comptes rendus de l'académie royale des sciences britannique*, un article sur les contraintes dans les sables secs, les mécanismes de déplacement des grains et leurs relations avec l'émission sonore. Bagnold proposa que les crissements et les autres émissions sonores aient la même cause : la «dilatance» *(voir la figure 3, à droite)*. Cette dilatance correspond à l'augmentation de volume qui résulte du glissement des grains, qui doivent se soulever un peu pour changer de position, en descendant d'un tas. De ce fait, lors du glissement d'une plaque, le volume d'air compris dans un tas (ou dans une dune) augmente et diminue alternativement, à mesure que les grains en mouvement se logent entre les grains inférieurs, puis se soulèvent.

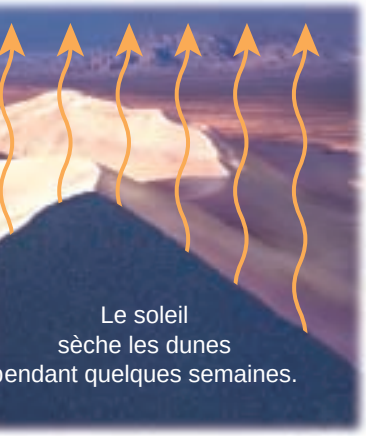
Dans cette hypothèse d'un son dû à la dilatance, les fréquences des sons produits par la vibration collective des grains varient comme l'inverse de la racine carrée de la taille moyenne des grains. Bien qu'élégant, le mécanisme ne permet pas de décrire complètement le phénomène des mugissements. Il n'explique pas, par exemple, comment quatre ou cinq modes de vibration sont engendrés à partir d'une seule avalanche de grains, et il n'explique pas non plus les sons graves et isolés qui accompagnent ce type d'événements.

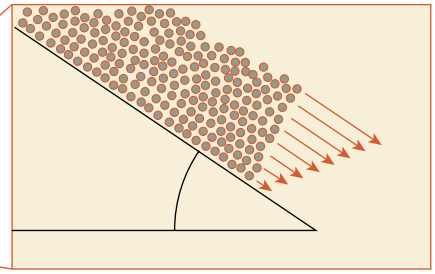
Les théories de Bagnold s'appliquent mieux aux crissements : selon les contraintes appliquées, différents types de cisaillements se produisent sur des plans, de manière analogue à ce qui se passe lors des avalanches. Seule l'amplitude de la force appliquée est différente. Là où le simple poids du sable provoque l'avalanche et induit des résonances, la pression sous le pied provoque des contraintes qui se traduisent par des crissements et des craquements ; les fréquences des sons émis dans ce cas sont mieux en accord avec la théorie de Bagnold que dans le cas des émissions sonores des dunes mugissantes.

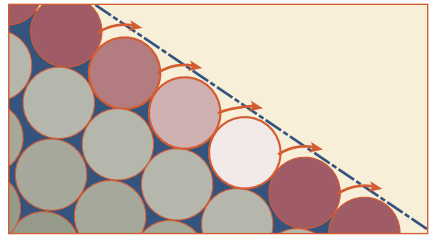
Crissements dans les chants

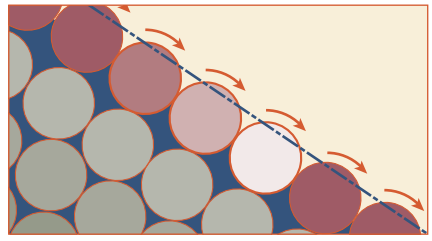
Les sables des dunes mugissantes crissent-ils également ? Cette idée fut avancée dès 1889 : Bolton écrivit que les sables d'Hawaii possédaient à la fois les propriétés sonores de ceux des plages et des déserts. Pendant les avalanches, ils produisent des sons analogues à ceux d'une dune égyptienne – le Jebel Nagous – et des ululements analogues à ceux produits par des sables de plages comme les sables d'Eigg, en Écosse, ou ceux de Manchester, dans le Massachusetts, quand ils sont secoués dans un sac.

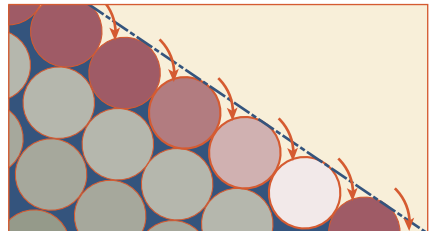
Au cours des années 1970, P. Haff réussit à produire des crissements de haute fréquence en utilisant des sables provenant des dunes mugissantes











du Sud-Est de la Californie, confirmant la théorie de Bagnold : les seules différences entre les mugissements et les crissements résultent des mécanismes d'avalanche ou de compression qui les provoquent.

Il existe cependant des différences entre des sables mugissants que l'on peut faire crisser en laboratoire et les sables connus pour crisser dans leur milieu naturel : P. Haff a montré que les spectres des sables mugissants sont riches, tandis que ceux des crissements sont plus purs.

Quelques lois sont maintenant établies : tout d'abord, les dunes mugissantes sont éloignées de la source des sables ; les grains ont été ainsi transportés par le vent sur de longues distances, et ils ont été polis et triés avant d'être déposés au sommet des dunes. Les émissions ont lieu quand la pluie a chassé les poussières et les plus petites particules d'entre les grains : après un séchage d'une à deux semaines, le vent doit être suffisamment fort pour soulever le sable au-dessus de la crête de la dune et pour provoquer des avalanches.

Le paramètre le plus important pour l'émission sonore est la résistance du sable aux contraintes de cisaillement : un sable dont les grains sont trop serrés bouge difficilement, tandis qu'un sable aux grains plus espacés se comporte comme un fluide, qui transmet mal les contraintes de cisaillement. Si le mécanisme d'émission sonore reste insuffisamment connu dans le détail, on sait bien que les caractéristiques des grains déterminent les sons produits.

L'étude des sables d'Hawaii semble intéressante, car les dunes des îles de Kauai et de Niihau, en retrait des plages, sont les seuls exemples connus de dunes mugissantes qui ne soient pas dans un désert. Leur sable, plus humide que celui des déserts, est composé de grains inhabituellement gros (de l'ordre de 0,46 millimètre de diamètre). En outre, la nature chimique des grains – du calcaire provenant de coquilles – est différente de celle des autres sables mugissants, tous composés de quartz. Comme l'exception permet de mieux comprendre la règle, l'étude de ces sables pourrait être très profitable. Les sons de ces sables peuvent être reproduits dans des récipients ou dans des sacs, mais, pour vraiment comprendre comment ils sont émis, un examen approfondi du processus de cisaillement est nécessaire. On pourrait notamment effectuer une analyse radiographique, afin de comprendre la propagation des contraintes de cisaillement.

La piézo-électricité des grains de sable doit également être explorée : lorsqu'un grain de silice est comprimé, des charges électriques de signes opposés apparaissent à ses extrémités. Ces charges peuvent contribuer à provoquer une attraction mutuelle des grains de sable. En 1936, Lewis a observé sur les glissements lents des sables mugissants du Kalahari que les grains se collaient les uns aux autres pour former des filaments de plusieurs centimètres. À l'aide d'électroscopes, on a vérifié que ces ensembles sont chargés électriquement, mais on ignore si la neutralisation des charges électriques dans le sable a une influence sur les sons émis. De même, on n'a pas établi que la présence d'effets électriques explique l'absence d'émissions sonores dans les sables humides.

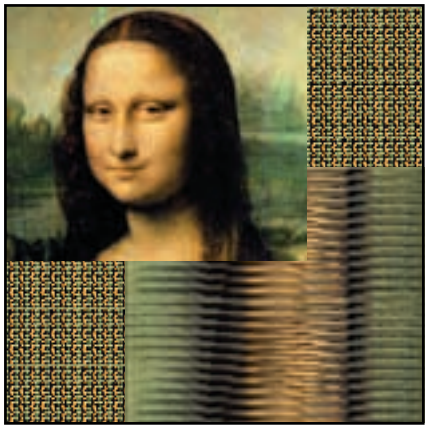
L'analyse de la composition minérale des grains des sables constitue enfin une voix de recherche prometteuse pour mieux comprendre l'importance des phénomènes de cisaillement : connaissant cette composition, les chimistes pourront fabriquer des sables mugissants synthétiques, avec lesquels les physiciens essaieront de résoudre le mystère des sables qui chantent.

Franco NORI, Paul SHOLTZ et Michael BRETZ étudient les sables mugissants à l'Université d'Ann Arbor.

R.A. BAGNOLD, *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, Londres, 1954.

J.F. LINDSAY, D.R. CRISWELL, T.L. CRISWELL et R.S. CRISWELL, *Sound-Producing Dune and Beach Sand*, in *Geological Society of America Bulletin*, vol. 87, pp. 463-473, 1976.

Paul SHOLTZ, Michael BRETZ et Franco NORI, *Sound-Producing Sand Avalanches*, à l'adresse : http://www-personal.engin.umich.edu/~nori/booming_sand.html du réseau Internet.



Images brouillées, images retrouvées

JEAN-PAUL DELAHAYE • PHILIPPE MATHIEU

La transformation du boulanger, du photomaton, et les charmes de l'arithmétique.

Le boulanger prend la pâte, l'étire, la replie, puis recommence. C'est la «transformation du boulanger» que les spécialistes du chaos utilisent depuis 20 ans pour expliquer les subtiles interactions entre l'ordre et la complexité, entre le déterminisme et le hasard. Par cette transformation, croit notre boulanger, les particules de pâte se mélangent, et sa pâte s'homogénéise. Est-ce certain ?

Notre projet ici sera modeste et ludique : nous allons utiliser la métaphore pâtissière pour maltraiter des images et observer quelques phénomènes étranges. La transformation du boulanger et celle que nous appellerons *la transformation du photomaton* nous feront assister en direct au brouillage progressif d'une image et à son «débrouillage» inattendu.

Un logiciel pour *Windows 95* réalisé à l'occasion de cet article est disponible. Les lecteurs pourront soit le demander à la revue (envoyer une disquette et une enveloppe timbrée pour le retour), soit le télécharger à partir du site Internet : http://www.lifl.fr/~mathieu/transform.

Le site contient des illustrations complémentaires et propose d'autres transformations avec lesquelles vous pourrez expérimenter en suivant les indications données dans cet article.

LES MÉLANGES BIJECTIFS DE PIXELS

Une image d'ordinateur est composée d'un nombre fini de points appelés pixels, qu'il est possible de traiter individuellement et donc de mélanger comme on mélange des cartes à jouer (nous reviendrons sur ce parallèle).

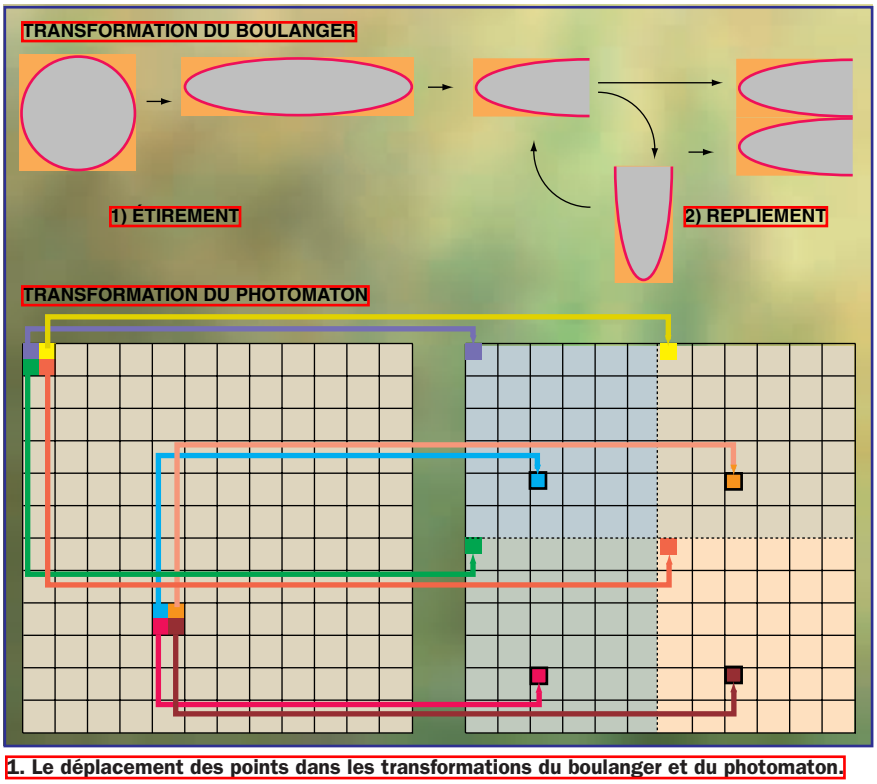
Les mélanges de points les plus intéressants sont les mélanges bijectifs (appelés aussi permutations) : chaque point d'une image est envoyé à la place d'un autre point dans la transformée, et aucun point n'est perdu. Après un mélange bijectif, l'image est toujours présente (puisqu'aucun point n'a été effacé), mais elle est mélangée et parfois méconnaissable.

Le mélange bijectif ayant été effectué, on peut l'appliquer une deuxième fois, puis une troisième, etc. On obtient ainsi une série d'images complètes, mais où l'on éprouve des difficultés – en général croissantes – à reconnaître l'image de départ.

Avec des images composées d'un nombre fini de pixels (c'est toujours le cas en informatique), un miracle se produit : au bout d'un certain temps, l'image de départ réapparaît absolument identique. Ce temps de retour est parfois énorme, mais nous verrons comment le calculer.

Dans le cas continu – c'est-à-dire quand on considère une image comportant une infinité de points –, ce retour à l'ordre est exceptionnel. Cependant, pour certaines transformations, il se produit approximativement ce qui intéresse les théoriciens de l'ordre et du désordre. Le retour approximatif dans le cas continu n'est peut-être pas étonnant puisque, dans le cas fini, le retour exact est une règle absolue : quel que soit le mélange bijectif considéré, le retour au départ se produit.

Partons pour ce voyage d'image en image cadencé par les transformations bijectives qui nous feront observer de curieuses brusques réapparitions de l'ordre là où le chaos semble s'imposer.



1. Le déplacement des points dans les transformations du boulanger et du photomaton.

LE BOULANGER DISCRET

Commençons par la transformation du boulanger. Nous partons d'une image de *n* lignes et *m* colonnes. Pour la couper en deux selon la hauteur et la largeur,

nous supposerons que n et m sont des nombres pairs.

Les points de la première ligne ont pour coordonnées :
(0,0), (1,0), ..., (m – 2,0), (m – 1,0).

Ceux de la deuxième ligne :
(0,1), (1,1), ..., (m – 2, 1), (m – 1,1), etc.

Nous simulerons l'étirement de la pâte en interpénétrant les lignes paires et les lignes impaires : la hauteur du rectangle de départ est ainsi divisée par deux et sa longueur multipliée par deux. Les deux lignes premières sont donc maintenant :
(0,0), (0,1), (1,0), (1,1), ...,(m – 2, 0), (m – 2, 1), (m – 1, 0), (m – 1, 1)
(0,2), (0,3), (1,2), (1,3), ...,(m – 2,2), (m – 2,3), (m – 1,2), (m – 1,3), etc.

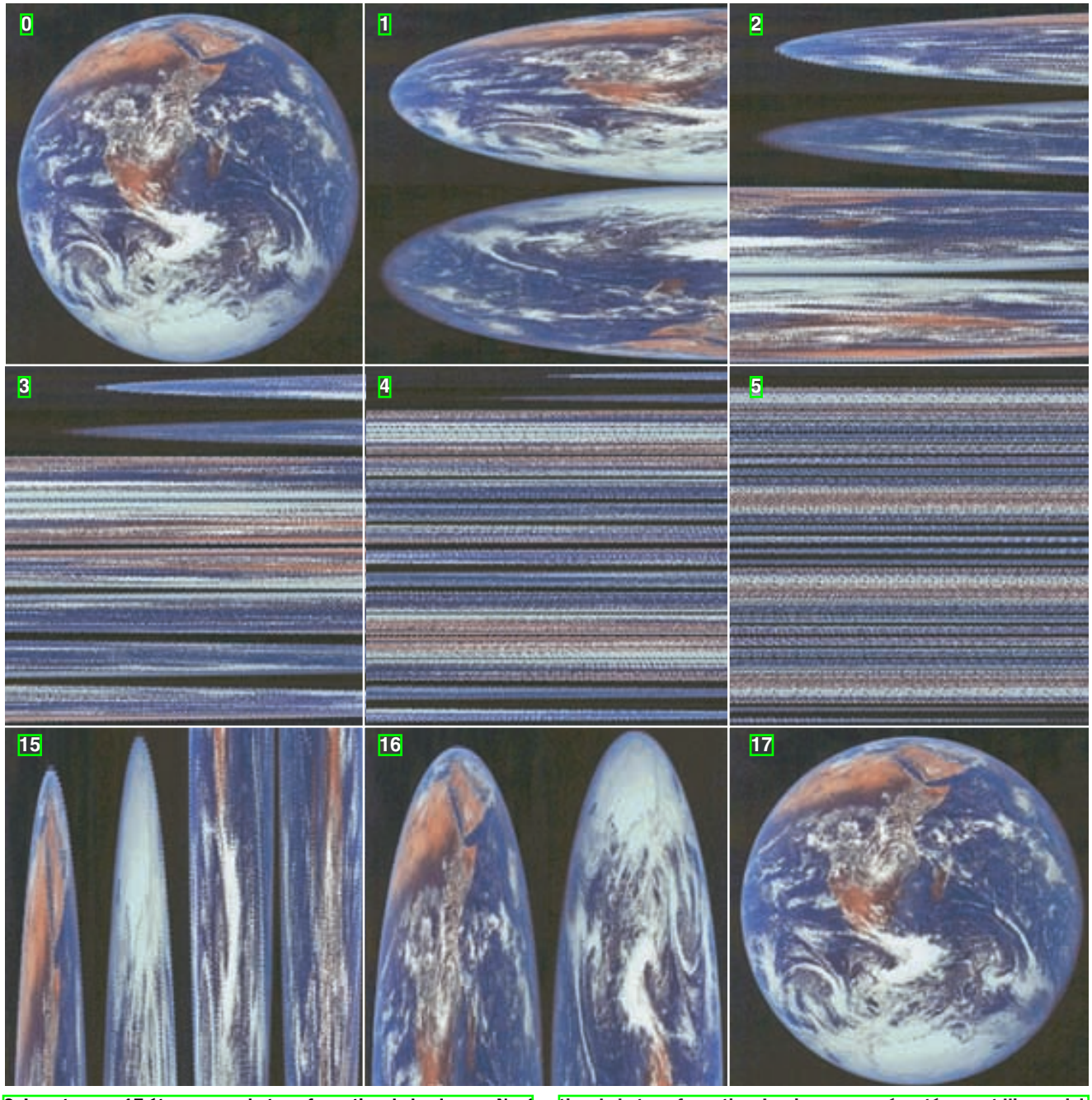
Le repliement de la pâte consiste à couper le rectangle en deux et à placer la partie droite sous la partie gauche après l'avoir fait pivoter de 180 degrés. Les points des premières lignes sont alors :
(0,0), (0,1), (1,0), (1,1), ..., (m/2 – 1,0) (m/2 – 1,1)
(0,2), (0,3), (1,2), (1,3), ..., (m/2 – 1,2), (m/2 – 1,3), etc.
et les points des dernières lignes résultant du repliement de la moitié droite :
(m – 1,3), (m – 1,2), (m – 2,3), (m – 2,2), ..., (m/2,3)(m/2,2),
(m – 1,1), (m – 1,0), (m – 2,1), (m – 2,0), ..., (m/2,1)(m/2,0),

Bien sûr, tout cela n'est pas très difficile à programmer ; plus difficile, en revanche, est la mise au point d'une interface agréable.

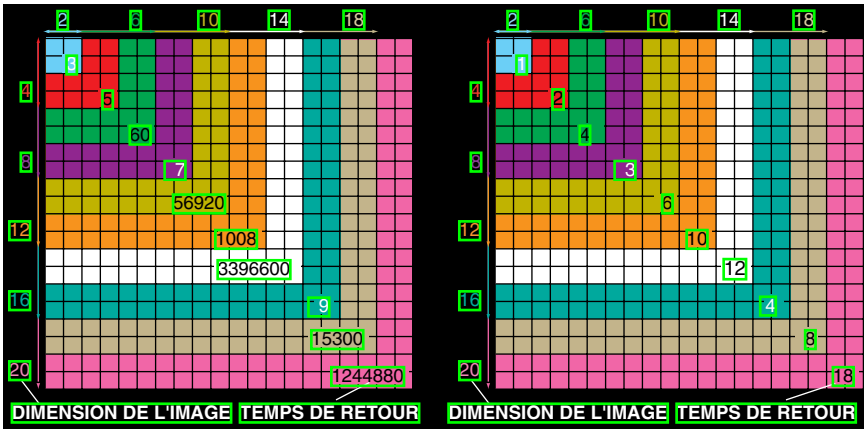
Nous pouvons donc maintenant expérimenter. L'attente du retour peut être très longue *(voir la figure 3)*.

Pour simplifier dans ce tableau, nous ne nous sommes intéressés qu'aux images carrées de 2p lignes et 2p colonnes.

Nous ignorons s'il existe une loi générale simple donnant ce temps de retour.



2. Le retour en 17 étapes avec la transformation du boulanger. Neuf images obtenues par la transformation du boulanger à la Terre en format 256 × 256. Le retour se fait après la dix-septième application de la transformation. Les images représentées sont l'image initiale (numérotée 0), puis celles obtenues après 1, 2, 3, 4, 5, 15, 16 et 17 applications de la transformation du boulanger.



3. Les temps de retour (nombre de transformations redonnant l'état initial de l'image) sont indiqués dans les coins inférieurs droits des carrés représentant différentes dimensions d'image. À gauche, la transformation du boulanger ; à droite, la transformation du photomaton.

Nous avons simplement constaté que si $n = 2^p$ le temps de retour est $2p + 1$. Comme nous allons le voir avec la transformation du photomaton, ces déterminations du temps de retour sont parfois assez difficiles.

La figure 2 donne la série (partielle) des images qu'on obtient à partir de la Terre en format 256 × 256. On remarquera un phénomène inattendu (sauf pour les spécialistes qui connaissaient le résultat) : l'image précédant le retour est le résultat de l'application d'une variante simple de la transformation du boulanger. Cette «transformation du boulanger inverse» consiste à étirer l'image – cette fois en un rectangle de largeur moitié et de hauteur double –, puis à replier le bas du rectangle en le faisant pivoter pour le placer à droite de la moitié du haut.

Le photomaton

La seconde transformation est encore plus surprenante. Elle montre que, dans un monde fini, en regardant de très loin une multitude de copies (approximatives) d'un objet donné, on le fait réapparaître. L'idée de cette transformation, qui nous l'a fait nommer photomaton, provient bien sûr de ces appareils qui vous délivrent quatre photographies d'identité semblables après que nous nous sommes assis dans une boîte bizarre qui nous a violemment éblouis.

Là encore, nous partons d'une image carrée ayant un nombre pair de lignes et de colonnes. Pour notre exposé, nous diviserons en quatre carrés l'image transformée, résultat de l'opération photomaton. Chaque groupe de quatre points contigus constituant un petit carré est éclaté *(voir la figure 1)* ; chacun de ces points va dans un des quatre carrés et donne : *(i)* un point de l'image transformée dans le carré en haut à gauche ; *(ii)* un point dans le carré en haut à droite ; *(iii)* un point dans le carré en bas à gauche et *(iv)* un point en bas à gauche . Les nouveaux points sont placés dans les quatre carrés de la transformée, à l'endroit correspondant à celui dont provient le petit carré. Par exemple, les quatre points du coin en haut à droite :

(0, 0) (1, 0)
(0, 1) (1, 1)

vont respectivement occuper les places :

(0, 0) (n/2, 0)
(0, n/2) (n/2, n/2),

c'est-à-dire les quatre points en haut à droite des quatre quarts du carré. De même, les quatre points (juste à côté) :

(2, 0) (3, 0)
(2, 1) (3, 1)

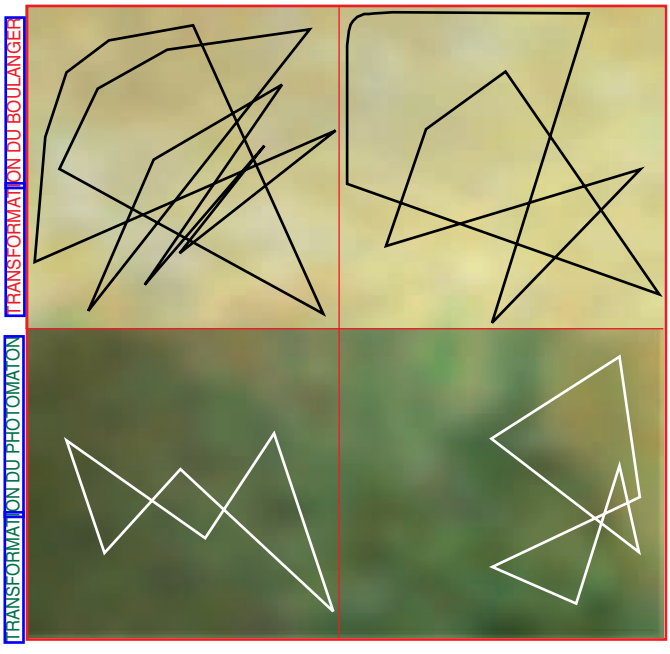
vont respectivement occuper les places :

(1, 0) (n/2 + 1, 0)
(1, n/2) (n/2 + 1, n/2).

Le résultat des applications du photomaton, cette fois en partant d'un texte, *(voir la figure 4)* est, dans un premier temps, sans surprise : on assiste à une multiplication du texte que l'on obtient en quatre exemplaires, puis 16, puis 64, etc. Tout à coup, cependant, on retrouve l'image de départ. Ce phénomène se produit très rapidement. Pourquoi donc ?

L'image précédant le retour, là encore, mérite d'être examinée, car elle est parfaitement lisible : il s'agit de la superposition des quatre quarts de l'image qui ont

4. Le retour en 8 étapes avec la transformation du photomaton sur une image d'un texte de Verlaine, en format 256x256.

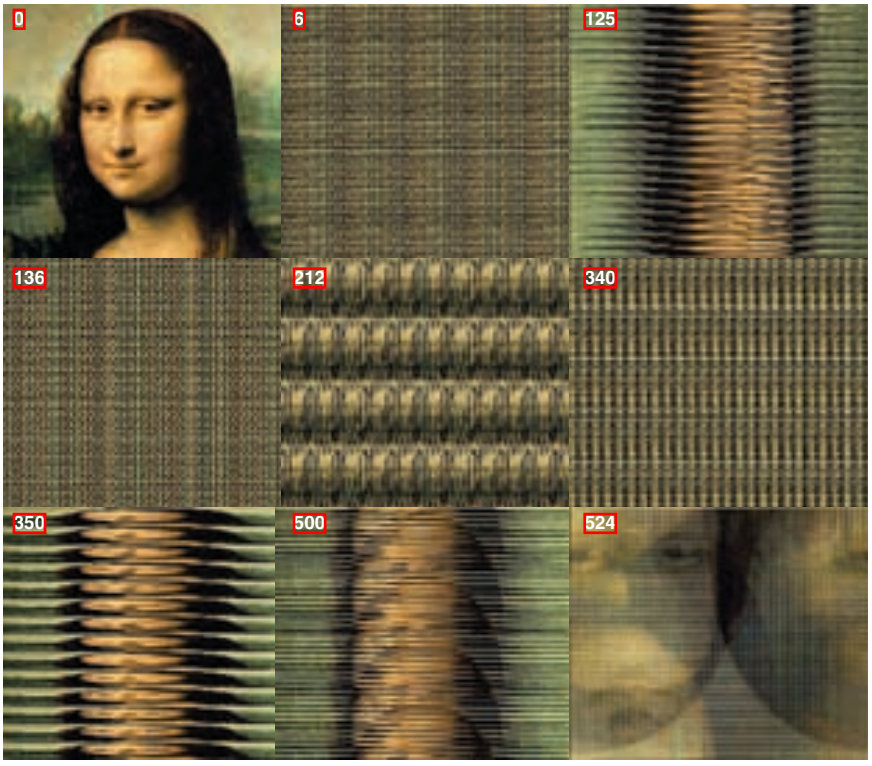


5. Chaque point appartient à un cycle : il est en bonne place sur les images dont le numéro est un multiple de la longueur du cycle.

chacun été agrandis d'un facteur deux. L'image précédente, on le devine alors, est la superposition des 16 seizièmes du texte. Etc. Les temps de retour sont indiqués pour différentes tailles d'images sur la figure 3.

Dans le cas d'un temps de retour très long, ce qui est le cas avec l'image de la Joconde en format 252 × 212, les images intermédiaires sont parfois étranges et laissent entrevoir des réminiscences partielles et déformées de l'image initiale *(voir la figure 6)*.

Le retour à l'ordre surprend, car on comprend mal qu'en mélangeant de plus en plus les points d'une image – ce qui en apparence la fractionne en morceaux déformés et battus –, on fasse revenir comme par magie l'image initiale. C'est que, dans les mondes où tout est discret, notre intuition fondée sur le continu nous fait défaut : un parallèle peut être proposé avec la mécanique quantique, où le passage à une conception quantique (la «mise en quanta» est une façon de discrétiser le monde physique) donne aussi une théorie dont bien des aspects contredisent les attentes de l'intuition.



6. Transformation du photomaton appliquée à une image de la Joconde. L'image a une taille 252x212. Le temps de retour est de 1 050 étapes. Certaines images sont totalement illisibles, d'autres laissent apparaître le motif initial découpé et déformé. Les images retenues ont pour numéro : 0 (image initiale), 6, 125, 136, 212, 340, 350, 500, 524. Nous vous invitons à utiliser notre logiciel pour admirer la série complète des 1 050 étapes.

Le calcul du temps de retour

Contrairement à l'exemple précédent, nous avons réussi pour la transformation du photomaton à calculer le temps de retour.

La méthode qui nous a menés au résultat est indirecte. Lors de nos nombreux essais, nous avons pris les mélanges de cartes classiques et les avons appliqués aux lignes et aux colonnes d'une image. Dans le mélange de cartes le plus simple (appelé séparation binaire), nous faisons deux paquets à partir d'un en plaçant alternativement les cartes à droite et à gauche, puis nous regroupons les deux paquets en un seul, en mettant celui qui contient la première carte au-dessus (cette première carte reste donc à sa place).

Un peu de réflexion vous persuadera que la transformation qui consiste à effectuer simultanément la séparation binaire sur les numéros des colonnes et sur les numéros des lignes est identique à la transformation du photomaton.

Le mélange de cartes inverse de la séparation binaire est le mélange *out-faro* (ou *Pharaon out*) : on insère de façon parfaite les cartes du demi-paquet supérieur dans le demi-paquet inférieur, en s'arrangeant pour que la carte placée en tête y reste (si elle passait en second, il s'agirait de l'*in-faro*. Ce résultat sur l'inverse de la séparation binaire a été expliqué dans le numéro de *Pour la Science* de mars 1997). Le mélange inverse de la transformation photomaton est donc nécessairement le résultat de l'*out-faro* appliqué aux lignes et aux colonnes, c'est-à-dire ce que nous avons observé : une superposition des quatre quarts agrandis de l'image (une petite réflexion supplémentaire vous en persuadera).

Cette compréhension de la nature profonde du photomaton (un mélange binaire simultané sur les colonnes et sur les lignes) nous conduit au temps de retour pour toutes les tailles d'images. Voici le raisonnement :

– D'une part, la période de l'*out-faro* (identique, puisque c'est la transformation inverse à celle du mélange binaire) est connue. Dans le cas particulier où n est égal à 2^i, c'est i. Dans le cas général pour $n = 2p$, le retour est le plus petit entier q tel que : $2^q - 1$ est divisible par $2p - 1$.

Prenons par exemple $p = 5$:
$2^1 - 1 = 1$ n'est pas divisible par 9 ;
$2^2 - 1 = 3$ n'est pas divisible par 9 ;
$2^3 - 1 = 7$ n'est pas divisible par 9 ;
$2^4 - 1 = 15$ n'est pas divisible par 9 ;
$2^5 - 1 = 31$ n'est pas divisible par 9 ;
$2^6 - 1 = 63$ est divisible par 9 ;
donc le temps de retour pour $p = 5$ (paquet de dix cartes) est 6.

Pour $p = 6$: on voit que $2^{10} - 1 = 1\,023$ est divisible par 11 et qu'on n'obtient rien avant. Le temps de retour est 10.

– D'autre part, lorsqu'une transformation opère indépendamment sur les lignes et sur les colonnes, on montre que le temps de retour est le plus petit commun multiple du temps de retour de la transformation des colonnes et du temps de retour de la transformation des lignes.

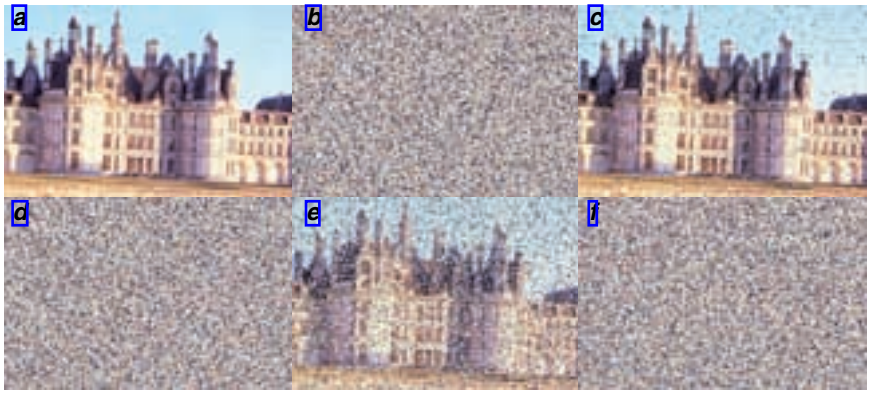
Pour notre transformation du photomaton, il en résulte que, si le rectangle a pour taille $(2p) \times (2p')$, le temps de retour sera le plus petit commun multiple :
– du plus petit q tel que $2^q - 1$ est divisible par $2p - 1$
– et du plus petit q' tel que $2^{q'} - 1$ est divisible par $2p' - 1$.

C'est peut-être compliqué, mais nous n'y pouvons rien ; tout ne se simplifie pas toujours en mathématiques.

Exemple. Pour une image de taille 10 × 12, le temps de retour sera donc le plus petit commun multiple de 6 et de 10 (voir la justification du 6 et du 10 plus haut), c'est-à-dire 30.

Le calcul du temps de retour

Les longs moments passés à attendre le retour de l'image nous ont conduits à concevoir et à programmer une méthode de calcul de ce temps de retour qui, même lorsqu'il est très grand, aboutit en quelques secondes. Cela permet à notre logiciel



7. Les retours approximatifs. La transformation du boulanger pour une image de taille 240 × 160. Les cycles ont respectivement les longueurs 1, 4, 29, 64, 156, 157, 274, 2183, 22458, 13 074. Ces nombres ont pour plus petit commun multiple 27 720 023 335 722 958 656 qui est le temps de retour (plutôt long !). À l'étape 40 000 000 images *(b)*, tout est brouillé. De même, aux étapes 50 000 000 *(d)* et 100 000 000 *(f)*. À l'étape 48 935 982 (qui est le ppcm de 13 074, 22 458, 4) les 35537 pixels *(c)* correspondant aux cycles de longueur 13074, 22458, 4 et 1 sont en bonne place. Cela représente une part importante des 38 400 points de l'image, que l'on reconnaît donc. À l'étape 98 455 872 (ppcm de 22 458, 274, 64, 4) à nouveau un nombre important (22 801) de points est en bonne place *(e)*.

de vous annoncer que, par exemple, l'image initiale sera de retour dans 10 ans 3 mois 5 jours 4 heures et 35 minutes.

Voici le principe de ce calcul qu'il est intéressant de détailler, puisqu'il fait comprendre le retour miraculeux à l'image de départ.

Lorsqu'on applique une transformation bijective, chaque point suit un cycle : par exemple, le point de coordonnées (0,0) va en (1,5) et le point de coordonnées (1,5) va en (3,7), le point de coordonnées (3,7) revient en (0,0) : (0,0) est revenu à sa place au bout de trois applications de la transformation. L'appartenance à un cycle (ici de longueur trois) est la règle générale : chaque point appartient ainsi à un cycle et un seul, dont la longueur bien sûr peut être n'importe quel nombre entier de taille inférieure au nombre de points de l'image. Aussi l'ensemble des points de l'image peut être décomposé en une liste de cycles : par exemple, l'un de longueur 3, un autre de longueur 6, un autre de longueur 15.

Il est clair que chaque point d'un cycle revient à sa place pour les images dont le numéro est un multiple de sa longueur ; donc l'image revient exactement identique à elle-même si son numéro est simultanément un multiple de toutes les longueurs des cycles, autrement dit, si c'est un multiple du plus petit commun multiple des longueurs des cycles. Le plus petit commun multiple de 3, 6 et 15 est 30, donc, avec notre exemple, le temps de retour est 30.

Connaître le temps de retour peut donc s'obtenir simplement en décomposant l'image en cycles et en calculant le plus petit commun multiple de la longueur des cycles trouvés : même si le temps de retour est de mille milliards, quelques secondes permettent alors de le savoir (ah, les merveilles du raisonnement mathématique !).

Mieux, grâce à la décomposition en cycles de la transformation, vous pouvez, en quelques secondes, connaître l'image numéro 1001 (ou n'importe quel autre nombre aussi grand soit-il) sans avoir à calculer les images précédentes. Explicitons cette idée, en supposant que les cycles sont, comme précédemment, de longueur 2, 6 et 15.

Vous calculez le reste de la division de 1001 par 2, c'est 1, et, pour chaque point de l'image appartenant à un cycle d'ordre 2, vous appliquez donc une fois la transformation.

Vous calculez le reste de la division de 1001 par 6, c'est 5 (car $1001 = 166 \times 6 + 5$) et donc, pour chaque point des cycles d'ordre 6, vous appliquez cinq fois la transformation à ces points.

Vous divisez 1001 par 15, ce qui donne un reste de 11. Pour les points appartenant aux cycles de longueur 15, vous appliquez donc 11 fois la transformation. Au total, vous n'avez que très peu appliqué la transformation (et à chaque fois en quelques points), pourtant vous connaissez maintenant la position de chacun des points après 1001 applications de la transformation.

Dans le cas général, l'utilisation de cette idée demande une bonne organisation du calcul et le stockage des cycles en mémoire. Mais, pour aller directement à une image lointaine, la procédure est incomparablement plus rapide que la méthode naturelle consistant à appliquer autant de fois qu'il le faut la transformation à chaque point de l'image.

Le flou expliqué

Cette décomposition en cycles nous permet aussi de comprendre pourquoi l'image revient proche de l'image initiale pour certaines valeurs du numéro d'image. En effet, imaginons que le temps de retour soit très long et de la forme $2m$. Supposons que l'on s'arrête à l'image numéro m. Tout cycle possède une longueur qui est un diviseur de $2m$ (car, d'après ce que l'on a vu, le temps de retour est un multiple de la longueur de chaque cycle) ; s'il y a des cycles d'ordre impair, leur longueur divise donc m, et donc leurs points sont bien en place dans l'image numéro m. Dès que suffisamment de points sont en place, le contenu de l'image nous apparaît superposé à une sorte de bruit qui ne nous empêche pas de voir l'image.

La figure 7 représente des images dont les numéros assurent ainsi que de nombreux points sont à la bonne place : les images obtenues sont des retours approximatifs à l'image de départ. On comprend alors qu'il n'y a pas à s'étonner, lors de l'application répétée d'une transformation bijective, de retrouver ces réminiscences partielles que nous avions remarquées dans la figure 6. L'explication de leurs déformations est de même nature.

Grâce à l'arithmétique des cycles, les fascinantes bizarreries des transformations bijectives de points deviennent un peu moins mystérieuses. Cela n'enlève rien à leurs charmes, que nous vous invitons à explorer en visitant notre site et en utilisant le logiciel que nous avons conçu pour cela.

Jean-Paul Delahaye est directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille du CNRS. Philippe Mathieu est professeur d'informatique au LIFL.

e-mail : delahaye@lifl.fr

Adresse internet pour d'autres images et le logiciel gratuit :

http://www.lifl.fr/~mathieu/transform

J.-P. Delahaye, *Le mélange des cartes*, in *Pour La Science*, mars 1997.

R.L. Devaney, *Chaotic Dynamical Systems*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1988.

H.-O. Peitgen, H. Jürgens et D. Saupe, *Chaos and Fractals, New Frontiers of Science*, Springer-Verlag, pp. 536-548, 1992.

I. Prigogine et I. Stengers, *La nouvelle alliance*, Gallimard, chapitre 9, 1979.

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

Écologie

Guide des 134 réserves naturelles de France

Chantal Cans et Antoine Reille. Éditions Delachaux et Niestlé, 1997.

Ce guide énumère les 134 réserves naturelles officielles de France métropolitaine et d'Outre-mer. Il succède à une première édition qui, en 1987, ne mentionnait que 85 réserves : le nombre de tels sites augmente de quatre à six chaque année, pour couvrir aujourd'hui plus de 280 000 hectares. À ce rythme, le chiffre de 150 sera peut-être atteint en l'an 2000, offrant ainsi un ensemble représentatif d'éléments du patrimoine national dont on assure la préservation.

Chaque réserve est décrite d'un quadruple point de vue géographique, géologique, botanique et zoologique. Une carte, originale, permet de reconnaître rapidement la configuration du site. Pour terminer chaque présentation, une fiche technique résume, sous la forme de pictogrammes : les caractéristiques (date de création et de révision, superficie, propriétaire, gestionnaire) ; la réglementation des activités (chasse, pêche, récoltes et cueillettes, fouilles) et de la circulation (véhicules à moteur, vélos et VTT, pédestre, à cheval, chiens, bateaux à moteur) ; l'accueil (point de réception, signalisation, visite guidée...).

Les réserves sont regroupées selon les types de milieux : ceux de montagne, les zones humides de l'intérieur, les îles, falaises, marais littoraux et réserves marines, les rivières et leurs rives, les sites d'intérêt botanique, les grottes et les sites d'importance géologique et paléontologique.

L'appellation «réserves naturelles» (partie d'écosystème terrestre ou aquatique bénéficiant d'un statut de protection partielle ou totale) couvre souvent des lieux aux vocations diverses, et bien que leur nombre paraisse important, d'autres espaces méritent encore une garantie nationale. De surcroît, leur dispersion, leur faible surface et leur environnement anthropisé les rend parfois vulnérables et fragiles.

Rappelons que la protection d'espèces rares de plantes ou d'animaux passe avant tout par la préservation de ces biotopes particuliers qui entretiennent la biodiversité. Dans le cas des insectes, certaines espèces rares ou localisées de libellules, par exemple, fréquentent ces réserves *(Lestes macrostigma, Coenagrian lunulatum...)*. Cependant, une seule réserve a été créée pour protéger un insecte : c'est la forêt de Cerisy, en Basse-Normandie, qui abrite la sous-espèce *cupreonitens* de *Chrysocarabus auranitens*. Ce carabe aux élytres variant du bronze au noir ne peut y être récolté, et la destruction des arbres morts, des souches et des talus, où il hiverne, est interdite.

Ces réserves bénéficient d'un statut juridique, mais cette réglementation stricte ne doit pas présumer que ces espaces soient fermés aux activités humaines et seulement réservés aux recherches scientifiques. Si c'est le cas pour huit d'entre eux, la plupart des autres sont aménagés, pour permettre l'observation de leurs richesses sans risque de destruction.

C'est pourquoi ce guide pratique (une liste alphabétique eût été plus commode qu'un index, avec passage obligé par la région, puis par le département) et complet nous engage à un voyage dans une nature encore préservée.

Jacques d'AGUILAR

A. Reille - Éditions Delachaux & Niestlé

Les bouquetins sont réapparus en Vanoise.

Médecine

Idées folles, idées fausses en médecine

Petr Skrabanek et James McCormick. Éditions Odile Jacob, 1997.

Quand j'ai abordé le domaine de la fertilité humaine, il était admis que le «meilleur jour» pour l'insémination artificielle avec donneur était le dernier point bas de la courbe thermique. La justification était que le nombre de succès obtenus pour ce jour était maximal. Je dis bien le nombre, et non le pourcentage. Ce qui n'étonne pas : on pratiquait le plus d'inséminations ce jour-là, parce qu'on le croyait le meilleur! Puis, dans mes études du cancer, une erreur m'a frappé : un cancérologue, sur un échantillon de quelques centaines de femmes atteintes d'un cancer du sein, observait que le cancer survenait d'autant plus tôt que les premières règles avaient été plus précoces. Comme l'âge de sur-

venue du cancer était quasiment leur âge actuel, je proposai d'examiner un échantillon témoin de femmes sans cancer : je constatai alors que plus les femmes étaient jeunes, plus leurs premières règles avaient été précoces. L'explication était que l'âge aux premières règles a baissé au cours du siècle : le cancer n'avait rien à voir dans cette affaire...

Ces deux fautes de raisonnement, la première évidente, et ridicule, la seconde plus pernicieuse, montrent la diversité des erreurs possibles. P. Skrabanek et J. McCormick en tentent un inventaire dans leur chapitre «Sophismes en tous genres», avec un esprit critique et caustique, pour le plus grand bénéfice des lecteurs.

Les premiers sophismes concernent la corrélation ; j'en retiendrai deux. La première erreur est la croyance en la transitivité de la corrélation : si *A* est lié à *B* et si *B* est lié à *C*, alors *A* serait automatiquement lié à *C*. Cette erreur fausse notamment l'interprétation de ce que l'on nomme les critères de substitution : dans l'évaluation de certains médicaments, on substitue à un critère intéressant, mais dont la connaissance est tardive (la mort, par exemple), ou rare ou difficile, un critère plus accessible, qui lui est lié. Ainsi, pour évaluer l'effet d'une alimentation sur le taux d'infarctus, on l'évaluera sur la baisse de la concentration en cholestérol. C'est là un pari commode, mais qui demande vérification. La nécessité de cette dernière n'est pas toujours ressentie. Dans notre essai *Concorde* sur l'efficacité de l'AZT administré dès les premiers symptômes de séropositivité, on a constaté un effet sur le nombre des lymphocytes *T*4, mais pas sur la survie. La plupart des médecins refusaient ce résultat : le nombre de lymphocytes *T*4 est si lié à la survie qu'une augmentation de ce nombre sans conséquences sur la survie semblait impossible. Pour les convaincre de la non-transitivité de la corrélation, j'ai dû poser la question : s'il y a corrélation entre la prise d'un médicament et la baisse du poids, faut-il penser, puisque le poids est lié à la taille, qu'il y aura baisse de taille?

La deuxième catégorie d'erreurs tourne autour du risque, par suite, surtout, de la confusion entre risque relatif et risque absolu. Les risques de cancer bronchique des fumeurs et des non-fumeurs sont des risques absolus. Le risque relatif est le risque des fumeurs rapporté à celui des non-fumeurs. Ainsi, dans plusieurs enquêtes, on observe que le risque relatif de cancer bronchique chez les fumeurs est de l'ordre de 10 : c'est dire que leur risque absolu est dix fois supérieur à celui des non-fumeurs. Le risque relatif est parlant, mais quelle portée à le résultat : «le risque des non-fumeurs est multiplié par 10» quand on ne précise pas ce risque des non-fumeurs?

Les auteurs ont raison de viser, à cet égard, l'exemple du tabagisme passif ; il y a peu, j'ai lu dans une revue à grande diffusion, ce conseil aux lectrices : «N'épousez pas un fumeur, vous mourrez deux fois plus.» Sans doute cette phrase lapidaire se référait-elle à une enquête japonaise qui montrait un risque de mort par cancer du poumon chez les non fumeuses d'environ 16 pour 100 000, en cas de tabagisme familial, contre environ 8 pour 100 000 autrement. C'est bien une multiplication par deux, qui frappe les esprits, mais un risque de 16 pour 100 000 au lieu de 8 pour 100 000 doit-il empêcher d'épouser l'homme qu'on aime?

D'autres erreurs sont présentées dans un chapitre sur le diagnostic. Je retiendrai la discussion sur le difficile problème de la distinction entre le normal et l'anormal. À partir de quel seuil est-on obèse? Ou hypertendu? Peu après la guerre, ma cholestérolémie se révéla hors des limites du normal indiquées par le laboratoire. Dix ans plus tard, sans que j'aie été traité, ma cholestérolémie était à l'intérieur de l'intervalle considéré comme normal. Elle n'avait pas changé, mais les limites s'étaient déplacées : la moyenne de la population française avait augmenté. P. Skrabanek et J. McCormick insistent judicieusement sur la distinction entre ce que je nomme l'anormal fréquentiel, et l'anormal opérationnel : est anormal fréquentiel le sujet dont la mesure s'écarte de la moyenne, de plus de deux écarts-types par exemple, tandis que l'anormal opérationnel est celui dont la mesure justifie un traitement. L'ignorance de cette distinction est bien sûr source d'erreurs médicales.

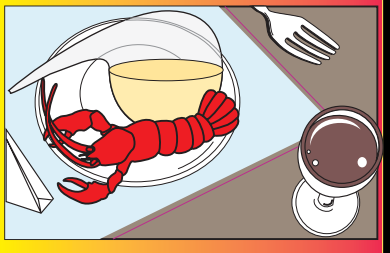
Dans un chapitre consacré aux placebos, les auteurs admettent que la seule solution rigoureuse pour évaluer l'effet d'un traitement en dehors de l'effet placebo consiste – quand c'est éthiquement possible – à conduire des essais où les traitements reçus sont ignorés du malade et, éventuellement, du médecin : c'est l'essai en double aveugle. Cependant, toujours critiques, ils considèrent qu'il est le plus souvent difficile, voire impossible, de réaliser un essai en vrai double aveugle. En fait, on peut toutefois y parvenir, même dans des cas difficiles, à condition de prendre des précautions. Ainsi, dans l'essai français sur le traitement du diabète par la ciclosporine, malades et médecins ignoraient le traitement reçu (ciclosporine pour un groupe,

FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

vous invitent à écouter la chronique de Marie-Odile Monchicourt :

Info Sciences

Tous les jours sur **France Info** à 15 heures 41, 17 heures 10, 20 heures 12, 22 heures 12, et 23 heures 42



Les prochains résultats présentés dans la rubrique Science et Gastronomie seront annoncés sur **France Info** le 25 janvier 1997.

FRANCE info

placebo pour l'autre), mais le statisticien en avait connaissance ; il était chargé, quand la ciclosporine provoquait un début d'effet secondaire, chez un patient, d'en diminuer la dose dans la proportion prévue par le protocole. Toutefois, pour qu'une telle diminution ne signe pas l'administration de ciclosporine, il faisait correspondre à ce patient un témoin tiré au sort et dont la dose de placebo était diminuée dans les mêmes proportions.

D'une manière générale, P. Skrabanek et J. McCormick propagent une vue pessimiste des essais thérapeutiques, ce que je regrette vivement, comme je regrette leurs réserves excessives pour la prévention. Après avoir caricaturé les excès de la prévention, ils passent en revue les domaines du cancer et des maladies cardio-vasculaires, mais de façon très partiale.

Pour les maladies cardio-vasculaires, notamment, ils considèrent que les essais portant sur les facteurs de risque les plus importants (régime alimentaire, tabagisme, tension artérielle, poids, sédentarité) n'ont donné que des résultats négatifs. Ils concluent que les examens font plus de mal que de bien et qu'en aucun cas on ne devrait envisager un dépistage systématique ou une intervention pour changer les habitudes alimentaires. Ces développements nous ramènent, non pas 10 ans en arrière (date de la première édition du livre), mais 20 ans ! À cette époque, M. Stamler et ses collègues de l'Université de Chicago imposaient leur loi dans les congrès, dans les journaux, et P. Skrabanek considérait comme un devoir de prendre le contre-pied de cette «pensée unique», d'où son humour et son exagération. Aujourd'hui, toutefois, nous disposons de nombreuses données solides, issues d'essais de prévention par des médicaments efficaces et sûrs. D'autre part, on a démontré que, quand on parvenait à corriger des habitudes de vie néfastes, on obtenait des bénéfices en matière de santé. Le bilan n'est donc absolument pas celui, caricatural, du livre.

Un des problèmes majeurs, en prévention, est le choix des priorités : entre une prévention exagérée, au prix de considérables sacrifices, et l'absence totale de prévention, un juste milieu est à trouver, adapté à chacun. Ce choix devrait revenir aux médecins, à condition qu'ils aient une connaissance suffisante en épidémiologie et, plus généralement, en méthodologie des sciences de la vie.

C'est bien cet objectif que visent P. Skrabanek et J. McCormick : estimant que des ignorances et des erreurs ralentissent le progrès de la médecine, ils ont professé un enseignement d'initiation au jugement critique en médecine. C'est de ce cours qu'est issu cet ouvrage. Toutefois, pour développer l'esprit critique, il est inopportun d'être trop critique... Leur livre comporte, en réalité, deux sortes de chapitres. Les uns décrivent des erreurs méthodologiques, objectives et «éternelles» ; les autres reflètent leur opinion sur des démarches qu'ils estiment erronées (démarches allant des essais cliniques au charlatanisme, en passant par la prévention). De telles opinions sont subjectives et peuvent fluctuer dans le temps. Les leurs ne sont plus défendables, aujourd'hui, compte tenu de données nouvelles, mais elles étaient déjà très critiquables lors de la première parution du livre, en langue anglaise, en raison de leur attitude partiale, à dessein provocatrice.

L'ouvrage gagnerait à être lu par les médecins français, essentiellement pour les erreurs méthodologiques, mais avec une grande réserve pour le reste.

Daniel SCHWARTZ

Paléontologie

La science de Jurassic Park. Comment fabriquer un dinosaure

Rob DeSalle et David Lindley.
Bayard Éditions, 1997.

Avis aux amateurs de dinosaures : ce livre leur en apprendra certainement plus sur la biologie moléculaire, la génétique et l'embryologie que sur leurs animaux favoris (bien que défunts). Avis aussi aux bricoleurs à qui les romans de Michael Crichton et les films de Steven Spielberg auraient pu donner l'envie de ressusciter un tyrannosaure ou un stégosaure : ils sortiront sans doute découragés de la lecture de ce livre. Les auteurs y prennent, en effet, un malin plaisir à décortiquer les manipulations scientifiques qui permettent aux biologistes brillants, mais quelque peu imprudents, de *Jurassic Park* de faire revivre des dinosaures, avec les conséquences que l'on sait (dans *Le monde perdu*, qui constitue la suite de *Jurassic Park*, il n'y a plus guère de science, au moins dans la version cinématographique : les dinosaures sont là pour dévorer tout ce qui passe à leur portée, et peu importe comment ils ont été fabriqués).

Dans un sens, ce livre est un tribut à l'imagination de M. Crichton et à son souci de vraisemblance : il est rare que l'on prenne le temps de consacrer un livre à la plausibilité des «ficelles» d'un ouvrage de science-fiction. Qui se soucie vraiment de savoir comment fonctionnent les soucoupes volantes d'*Independence Day* ou de tous ses prédécesseurs, et s'il est possible de fabriquer de tels engins ? L'argument de *Jurassic Park* a davantage fait réfléchir, sans doute parce qu'il touche à une des grandes peurs de notre temps, celle des manipulations génétiques (Dolly, la brebis clonée, parce qu'elle est bien réelle, a fait certainement plus peur à certains que les dinosaures ravageurs de M. Crichton et de S. Spielberg).

Tout paléontologue qui a eu à commenter le film de S. Spielberg s'est vu poser la question : peut-on vraiment faire revivre des dinosaures à partir d'ADN fossile ? Le livre de Rob DeSalle et David Lindley devrait rassurer les plus timorés face au génie génétique. Avec sérieux, mais non sans humour, ils reprennent tout le processus, de la récolte d'insectes conservés dans l'ambre jusqu'à l'éclosion des dinosaures et leur installation dans le Parc jurassique, afin de montrer à quel point chaque étape est semée d'embûches quasi infranchissables. Même si, fort prudemment, ils ne se prononcent pas sur ce qui sera peut-être possible dans une cinquantaine d'années, leur verdict paraît clair : la résurrection des dinosaures, ce n'est pas pour demain, d'autant que des résultats récents, postérieurs à la rédaction du livre, ont jeté des doutes sérieux sur la possibilité de conservation d'ADN au-delà de quelques milliers d'années.

Même si ce livre ne se conclut pas sur une note optimiste pour les bricoleurs de dinosaures potentiels, sa lecture est loin d'être un exercice stérile : on y apprend beaucoup sur la biologie moléculaire, le génie génétique et le développement embryonnaire, un peu moins sur la paléontologie. Les débats sur la responsabilité et l'éthique des chercheurs qui auraient été un peu hors sujet ont été évoqués en trois pages. Voici donc un livre original, d'une lecture assez agréable, et auquel les paléontologues pourront désormais renvoyer journalistes et curieux désireux de savoir si, oui ou non, on peut aujourd'hui faire revivre en chair et en os un dinosaure.

Eric BUFFETAUT

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de *Pour la Science* est donnée sur notre site Internet, à l'adresse : http://www.pourlascience.com

Index 1997

ARTICLES

Archéologie – Ethnologie Paléontologie

ARCHÉOLOGIE À DISTANCE *(L')*, par Farouk El-Baz, n° 240, p. 76.
ART DU VIN CHEZ LES GAULOIS *(L')*, par Michael Dietler, n° 237, p. 68.
ART RUPESTRE D'AFRIQUE AUSTRALE *(L')*, par Anne Solomon, n° 231, p. 84.
ÉMERGENCE PRÉCOCE DU NÉOLITHIQUE AU SAHARA *(L')*, par Ginette Aumassip, n° 234, p. 56.
POISSONS LUMINEUX FOSSILES DES CARPATES *(Les)*, par Ruzena Gregorova, n° 239, p. 66.
POUVOIR DES DRUIDES *(Le)*, par Jean-Louis Brunaux, n° 233, p. 38.
PREMIERS EXODES *(Les)*, par Ian Tattersall, n° 236, p. 40.
PREMIERS HOMINIDÉS EN AFRIQUE *(Les)*, par Meave Leakey et Alan Walker, n° 238, p. 36.
RICHESSE DES PROVINCES DE L'EMPIRE AZTÈQUE *(La)*, par Michael Smith, n° 242, p. 66.
TOMBES IMPÉRIALES DE LA DYNASTIE TANG *(Les)*, par Alexander Koch, n° 238, p. 70.
TRÉSORS DU BOUDDHISME CHINOIS DE DUNHUANG *(Les)*, par Neville Agnew et Fan Jinshi, n° 239, p. 58.
VIE QUOTIDIENNE DANS L'ÉGYPTE ANCIENNE *(La)*, par Andrea McDowell, n° 232, p. 86.

Astronomie Astrophysique

CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR MARS *(Les)*, par Jeffrey Kargel et Robert Strom, n° 231, p. 36.
DEUTÉRIUM PRIMORDIAL *(Le)*, par Craig Hogan, n° 232, p. 44.
GALAXIES FANTÔMES *(Les)*, par Gregory Bothun, n° 234, p. 84.
HIPPARCOS, SATELLITE CHASSEUR D'ÉTOILES, par F. Mignard et Ch. Martin, n° 235, p. 70.
MERCURE, LA PLANÈTE OUBLIÉE, par Robert Nelson, n° 242, p. 84.
PREMIÈRES GALAXIES DE L'UNIVERS *(Les)*, par F. Duccio Macchetto et M. Dickinson, n° 237, p. 52.
RAYONS COSMIQUES *(Les)*, par James Cronin, Thomas Gaisser et Simon Swordy, n° 233, p. 54.
SOHO RÉVÈLE LES SECRETS DU SOLEIL, par Kenneth Lang, n° 238, p. 54.
SURSAUTS GAMMA *(Les)*, par Gerald Fishman et Dieter Hartmann, n° 239, p. 72.
TÉLESCOPES GRAVITATIONNELS *(Les)*, par Françoise Combes et Tommy Wiklind, n° 242, p. 58.

Biologie – Génétique Médecine – Physiologie

ADN MITOCHONDRIAL, MALADIES ET VIEILLISSEMENT, par Douglas Wallace, n° 240, p. 52.
COMMENT ÉVALUER L'EFFICACITÉ DES MÉDICAMENTS, par Vittorio Bertele' et Silvio Garattini, n° 241, p. 128.
COMMENT NOTRE CERVEAU CALCULE-T-IL?, par Stanislas Dehaene, n° 236, p. 50.
COMMUNICATION DES BACTÉRIES *(La)*, par Richard Losick et Dale Kaiser, n° 234, p. 76.
CORNE D'ABONDANCE EST ENCORE PLEINE *(La)*, par Pierre Potier, n° 241, p. 30.
CORPS, L'ESPRIT ET LA MALADIE *(Le)*, par Esther Sternberg et Philip Gold, n° 241, p. 154.
DU GÈNE AU TRAITEMENT, par William Haseltine, n° 235, p. 28.
FLÉAU DES MALADIES MENTALES *(Le)*, par Arthur Kleinman et Alex Cohen, n° 235, p. 80.
IMMUNOTHÉRAPIE DES COCAÏNOMANES *(L')*, par Donald Landry, n° 234, p. 64.
MALADIE DE PARKINSON *(La)*, par Moussa Youdim et Peter Riederer, n° 233, p. 60.
MÉDICAMENTS ET L'ALCOOL *(Les)*, par Catherine Girre et Guy Thomas, n° 241, p. 138.
MIGRAINE *(La)*, par Marie-Germaine Bousser, Hélène Massiou et Anne Ducros, n° 239, p. 32.
MOLÉCULES ADHÉSIVES ET LA SANTÉ *(Les)*, par Alan Horwitz, n° 237, p. 44.
ORGANISMES DE L'EXTRÊME *(Les)*, par Michael Madigan et Barry Marrs, n° 236, p. 86.
PORES ARTIFICIELS DANS LES CELLULES *(Des)*, par Hagan Bayley, n° 241, p. 84.
POURQUOI CERTAINES PERSONNES RÉSISTENT AU SIDA, par Stephen O'Brien et Michael Dean, n° 240, p. 82.
REQUINS ET L'ORIGINE DE L'IMMUNITÉ DES INVERTÉBRÉS *(Les)*, par G. Litman, n° 231, p. 52.
RÉSISTANCE DES BACTÉRIES AUX ANTIBIOTIQUES *(La)*, par Antoine Andremont, Denis Corpet et Patrice Courvalin, n° 232, p. 66.
SOI, LE NON-SOI ET LES VIRUS *(Le)*, par Rolf M. Zinkernagel, n° 236, p. 64.
SYSTÈME IMMUNITAIRE DES INVERTÉBRÉS *(Le)*, par Gregory Beck et Gail Habicht, n° 231, p. 46.
THÉRAPIE GÉNIQUE ET SYSTÈME NERVEUX, par Dora Ho et Robert Sapolsky, n° 241, p. 80.
THÉRAPIE GÉNIQUE, PROMESSES ET LIMITES *(La)*, par Theodore Friedmann, n° 241, p. 60.
THÉRAPIE GÉNIQUE SANS VIRUS *(La)*, par Philip Felgner, n° 241, p. 66.
VACCINS *(Les)*, par Rino Rappuoli, Sergio Abrignani et Guido Grandi, n° 241, p. 90.
XÉNOTRANSPLANTATIONS *(Les)*, par R. Lanza, D. Cooper et W. Chick, n° 239, p. 80.

Botanique – Zoologie

ANIMAUX ET MÉDICAMENTS, par Claude Marcel Hladik, n° 241, p. 48.
COOPÉRATION CHEZ LES LIONS *(La)*, par Craig Packer et Anne Pusey, n° 237, p. 60.
GUÊPES ET APPRENTISSAGE, par Joan van Baaren, Guy Boivin et Jean-Pierre Nénon, n° 238, p. 48.
OFFRANDES NUPTIALES DES INSECTES *(Les)*, par Darryl Gwynne, n° 240, p. 90.
PLANTES À SANG CHAUD *(Des)*, par Roger Seymour, n° 235, p. 90.
RECHERCHE DES SIMPLES *(La)*, par Xavier Lozoya, n° 241, p. 34.

Géologie – Géophysique Océanographie

CLIMAT DE DEMAIN *(Le)*, par T. Karl, N. Nicholls et J. Gregory, n° 237, p. 38.
COMMENT L'ÉROSION CONSTRUIT LES MONTAGNES, par Nicholas Pinter et Mark Brandon, n° 236, p. 78.
CONCRÉTIONS DES GROTTES ENREGISTRENT CLIMATS ET SÉISMES *(Les)*, par Paul Dubois et Bertrand Grellet, n° 231, p. 28.
COULÉES DE BOUE *(Les)*, par Philippe Coussot, n° 240, p. 62.
DÉCHETS NUCLÉAIRES NATURELS, par Paul-Louis Blanc, François Gauthier-Lafaye et Emmanuel Ledoux, n° 237, p. 82.
INTERFÉROMÉTRIE RADAR PAR SATELLITE *(L')*, par Didier Massonnet, n° 234, p. 48.
MUSIQUE DES SABLES *(La)*, par Franco Nori, Paul Sholtz et Michael Bretz, n° 242, p. 94.
POUSSIÈRES ATMOSPHÉRIQUES ET PLUIES ACIDES, par L. Hedin et G. Likens, n° 232, p. 74.
PRÉPARATION D'UN GRAND SÉISME *(La)*, par Armando Cisternas, Louis Dorbath, Bertrand Delouis et Hervé Philip, n° 242, p. 42.
RELIEFS SOUS-MARINS *(Les)*, par Lincoln Pratson et William Haxby, n° 238, p. 42.

Histoire des sciences et des techniques

CENTENAIRE DU THÉORÈME DES NOMBRES PREMIERS *(Le)*, par Michel Balazard, n° 233, p. 93.
CONCOURS MANDARINAUX *(Les)*, par Rainier Lanselle, n° 242, p. 50.
INTRODUCTION DE L'ALPHABET LATIN AU JAPON *(L')*, par Florian Coulmas, n° 234, p. 90.
JULES VERNES, VISIONNAIRE INCOMPRIS, par Arthur Evans et Ron Miller, n° 236, p. 94.
KAMERLINGH ONNES DÉCOUVRE LA SUPRACONDUCTION, par Rudolf de Bruyn Ouboter, n° 235, p. 84.
PETIT PÈRE HADAMARD *(Le)*, par Laurent Schwartz, n° 233, p. 88.
RÉFRIGÉRATEURS D'EINSTEIN ET DE SZILARD *(Les)*, par Gene Dannen, n° 233, p. 82.

Physique – Chimie

CHIMIE COMBINATOIRE ET NOUVEAUX MÉDICAMENTS, par Matthew Plunkett et Jonathan Ellman, n° 236, p. 72.
CHIMIE COMBINATOIRE VIRTUELLE, par Roger Lahana, n° 241, p. 56.
CHIMIE DES FORMES *(La)*, par Patrick de Kepper et Étiennette Dulos, n° 235, p. 34.
CHIMIE MÉDICINALE *(La)*, par Georges Teutsch, n° 241, p. 106.
DÉCOUVERTE DU QUARK *TOP* *(La)*, par Tony Liss et Paul Tipton, n° 240, p. 68.
FOUDRE AU-DESSUS DES NUAGES *(La)*, par S. Mende, D. Sentman et E. Wescott, n° 240, p. 48.
INSTRUMENTS À VENT HARMONIQUES *(Des)*, par Jean-Pierre Dalmont, Joël Gilbert et Jean Kergomard, n° 238, p. 78.
INVENTION RETROUVÉE DE LA PHOTOGRAPHIE *(L')*, par Jean-Louis Marignier et Michel Ellenberger, n° 232, p. 36.
LASER *MÉGAJOULES* *(Le)*, par Jacques Coutant, n° 242, p. 76.
NANOMATÉRIAUX *(Les)*, par Richard Siegel, n° 232, p. 58.

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

SUPERORDINATEURS ANALYSENT LA TURBULENCE *(Les)*, par P. Moin et J. Kim, n° 233, P. 46.
SYNTHÈSE COMBINATOIRE *(La)*, par Daniel Michelet et Claude Hélène, n° 241, p. 50.
SYNTHÈSE ORDONNÉE DES MATIÈRES PLASTIQUES *(La)*, par John Ewen, n° 237, p. 76.
TAMBOURS LIQUIDES *(Les)*, par Maria Brazovskaia, Catherine Even et Pawel Pieranski, n° 234, p. 68.
VERS UNE CONCEPTION RATIONNELLE DES MÉDICAMENTS, par Gerd Folkers et Hugo Kubinyi, n° 241, p. 40.
VOIR SANS REGARDER, par Paul Kwiat, Harald Weinfurter et Anton Zeilinger, n° 231, p. 68.

SCIENCES HUMAINES

AMIANTE : LE DOSSIER FRANÇAIS, par Jean-Pierre Favre-Trosson, n° 239, p. 54.
COMMENT LES AVEUGLES DESSINENT, par John Kennedy, n° 233, p. 76.
DYSLEXIE *(La)*, par Sally Shaywitz, n° 231, p. 76.
ÉTHIQUE ET PLACEBO, par Francisco de Abajo et Diego Gracia, n° 241, p. 146.
ÉVOLUTION DE L'EXPÉRIMENTATION ANIMALE *(L')*, par Madhusree Mukerjee, n° 234, p. 42.
EXPÉRIMENTATION ANIMALE : UTILITÉ ET ÉTHIQUE *(L')*, par Andrew Rowan, n° 234, p. 33.
EXPÉRIMENTATION VITALE *(L')*, par Pierre Tambourin, n° 234, p. 40.
FAUX SOUVENIRS *(Les)*, par Elizabeth Loftus, n° 242, p. 34.
GESTION DES ERREURS HUMAINES À BORD D'UN AVION *(La)*, par R. Helmreich, n° 237, p. 88.
GRANDEUR ET DÉCADENCE DE L'AMIANTE, par J. Alleman et B. Mossman, n° 239, p. 48.
IRAN CONSTRUIT-IL DES ARMES NUCLÉAIRES? *(L')*, par David Schwarzbach, n° 238, p. 32.
LEURRES ET GASPILLAGE, par Neal Barnard et Stephen Kaufman, n° 234, p. 34.
MENACE PERMANENTE DES ARMES BIOLOGIQUES *(La)*, par Leonard Cole, n° 232, p. 52.
PEUT-ON SAUVER LES FORÊTS TROPICALES?, par Richard Rice, Raymond Gullison et John Reid, n° 236, p. 58.
PROGRÈS ET SÉCURITÉ, par Jack Botting et Adrian Morrison, n° 234, p. 37.
RU 486, PRINCIPE ACTIF SOCIALEMENT CONTESTÉ *(Le)*, par Édouard Sakiz, n° 241, p. 122.
SCIENCE DE LA LOI DE MURPHY *(La)*, par Robert Matthews, n° 234, p. 100.

TECHNIQUE

ANIMAUX TRANSGENIQUES PRODUISENT DES MÉDICAMENTS *(Des)*, par William Velander, Henryk Lubon et William Drohan, n° 233, p. 70.
ARCHIVES D'UN RÉSEAU ACTIF *(Les)*, par Brewster Kahle, n° 235, p. 68.
BIBLIOTHÈQUES NUMÉRIQUES *(Les)*, par Michael Lesk, n° 235, p. 49.
DU LABORATOIRE À L'USINE, par Georg Arnold Krei et Ernst Buschmann, n° 241, p. 98.
ÉNERGIE DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES *(L')*, par Cord-Henrich Dustmann, n° 231, p. 64.
ENGRAIS ET DÉMOGRAPHIE, par Vaclav Smil, n° 239, p. 86.
FILTRAGE D'INFORMATIONS *(Le)*, par Paul Resnick, n° 235, p. 52.
GRILLON ROBOT *(Un)*, par Barbara Webb, n° 232, p. 80.
INTERFACES DE RECHERCHE *(Les)*, par Marti Hearst, n° 235, p. 57.
LASERS POUR DÉCLENCHER LA FOUDRE *(Des)*, par Jean-Claude Diels, Ralph Bernstein, Karl Stahlkopf et Xin Miao Zhao, n° 240, p. 42.
MULTILINGUISME *(Le)*, par B. Oudet, n° 235, p. 55.
NOUVELLES FORMES GALÉNIQUES *(Les)*, par A. Frigerio et F. Bodega, n° 241, p. 114.
ORDINATEURS CONFIGURABLES *(Les)*, par John Villasenor et William Mangione-Smith, n° 238, p. 62.
PELLICULAGE *(Le)*, par S. Porter, n° 241, p. 136.
PRODUCTION DE MÉDICAMENTS PAR GÉNIE GÉNÉTIQUE, par Gabor Stiegler, Georg-Burkhard Kresse et Peter Buckel, n° 241, p. 72.
RECHERCHE D'IMAGES NUMÉRIQUES *(La)*, par David Forsyth, Jitendra Malik et Robert Wilensky, n° 238, p. 86.
RECHERCHE D'INFORMATIONS *(La)*, par Clifford Lynch, n° 235, p. 44.
SYSTÈMES SÉCURISÉS *(Les)*, par Mark Stefik, n° 235, p. 62.
TRANSFERTS RAPIDES, par Jacques Dupraz, n° 235, p. 66.
VÉHICULES ÉLECTRIQUES *(Les)*, par Daniel Sperling, n° 231, p. 58.
VOILES DE COURSE *(Les)*, par Brian Doyle, n° 239, p. 40.

L'EXPÉRIENCE DU MOIS

LE PINCEAU DU PEINTRE, par François Perego, n° 231, p. 94.
UNE COMÈTE PAR LA QUEUE, par Shawn Carlson, n° 232, p. 106.
DU COURANT DANS LES ROCHES, par Pascal Bernard, n° 233, p. 100.
LE BRIQUET PNEUMATIQUE, par Paul Boutié et Ioannis Manos, n° 234, p. 108.
ILLUSIONS MUSICALES, par Shawn Carlson, n° 236, p. 106.
LA FONTAINE QUI DANSE, par Frédérique Giorgiutti et Laurent Limat, n° 237, p. 94.
J'AI DESCENDU DANS MON JARDIN..., par F. Perego, n° 238, p. 94.
SABLIER INVERSÉ, par Pierre Évesque, n° 239, p. 94.

LOGIQUE ET CALCUL

OBSESSION DE π, par Jean-Paul Delahaye, n° 231, p. 104.
CRÉATURES, n° 232, par Christoph Pöppe, p. 100.
LES MÉLANGES DE CARTES, par J.-P. Delahaye, n° 233, p. 102.
LA RESSEMBLANCE MATHÉMATISÉE, par J.-P. Delahaye, n° 235, p. 100.
VOTES ÉTRANGES ET PARADOXAUX, par J.-P. Delahaye, n° 236, p. 102.
LES VÉRITÉS MATHÉMATIQUES, par J.-P. Delahaye, n° 237, p. 100.
VOYAGEURS ET BAGUENAUDIERS, par J.-P. Delahaye, n° 238, p. 100.
LES ORDINATEURS MATHÉMATICIENS, par J.-P. Delahaye, n° 239, p. 100.
L'ART DU TRI, par J.-P. Delahaye, n° 240, p. 100.
STATUT MATHÉMATIQUE DES CONTRADICTIONS, par J.-P. Delahaye, n° 241, p. 164.
IMAGES BROUILLÉES, IMAGES RETROUVÉES, par J.-P. Delahaye et Philippe Mathieu, n° 242, p. 102

VISIONS MATHÉMATIQUES

LE *MONOPOLY* REVISITÉ, par Ian Stewart, n° 231, p. 102.
LES CARRÉS ALPHAMAGIQUES, par I. Stewart, n° 232, p. 96.
SABLE ET GÉOMÉTRIE, par Roger Iss, n° 234, p. 104.
LE JEU DE JUNIPER GREEN, par I. Stewart, n° 237, p. 106.
DES VACHES DANS LE LABYRINTHE, par I. Stewart, n° 238, p. 106.
LA QUADRATURE DU CARRÉ, par I. Stewart, n° 240, p. 96.

AUTEURS

A – B

ABAJO Francisco de, *Éthique et placebo*, n° 241, p. 146.
ABRIGNANI Sergio, *Les vaccins*, n° 241, p. 90.
AGNEW Neville, *Les trésors du bouddhisme chinois de Dunhuang*, n° 239, p. 58.
ALLEMAN James, *Grandeur et décadence de l'amiante*, n° 239, p. 48.
ANDREMONT Antoine, *La résistance des bactéries aux antibiotiques*, n° 232, p. 66.
AUMASSIP Ginette, *L'émergence précoce du Néolithique au Sahara*, n° 234, p. 56.
BAAREN Joan van, *Guêpes et apprentissage*, n° 238, p. 48.
BALAZARD Michel, *Le centenaire du théorème des nombres premiers*, n° 233, p. 93.
BARNARD Neal, *Leurres et gaspillage*, n° 234, p. 34.
BAYLEY Hagan, *Des pores artificiels dans les cellules*, n° 241, p. 84.
BECK Gregory, *Le système immunitaire des invertébrés*, n° 231, p. 46.
BERNSTEIN Ralph, *Des lasers pour déclencher la foudre*, n° 240, p. 42.
BERTELE' Vittorio, *Comment évaluer l'efficacité des médicaments*, n° 241, p. 128.
BLANC Paul-Louis, *Déchets nucléaires naturels*, n° 237, p. 82.
BODEGA Francesca, *Les nouvelles formes galéniques*, n° 241, p. 114.
BOIVIN Guy, *Guêpes et apprentissage*, n° 238, p. 48.
BOTHUN Gregory, *Les galaxies fantômes*, n° 234, p. 84.
BOTTING Jack, *Progrès et sécurité*, n° 234, p. 37.
BOUSSER Marie-Germaine, *La migraine*, n° 239, p. 32.
BRANDON Mark, *Comment l'érosion construit les montagnes*, n° 236, p. 78.
BRAZOVSKAIA Maria, *Les tambours liquides*, n° 234, p. 68.
BRETZ Michael, *La musique des sables*, n° 242, p. 94.
BRUNAUX Jean-Louis, *Le pouvoir des druides*, n° 233, p. 38.
BRUYN OUBOTER Rudolf de, *Kamerlingh Onnes découvre la supraconduction*, n° 235, p. 84.
BUCKEL Peter, *Production de médicaments par génie génétique*, n° 241, p. 72.
BUSCHMANN Ernst, *Du laboratoire à l'usine*, n° 241, p. 98.

C – D

CHICK William, *Les xénotransplantations*, n° 239, p. 80.
CISTERNAS Armando, *La préparation d'un grand séisme*, n° 242, p. 42.
COHEN Alex, *Le fléau des maladies mentales*, n° 235, p. 80.
COLE Leonard, *La menace permanente des armes biologiques*, n° 232, p. 52.
COMBES Françoise, *Les télescopes gravitationnels*, n° 242, p. 58.
COOPER David, *Les xénotransplantations*, n° 239, p. 80.
CORPET Denis, *La résistance des bactéries aux antibiotiques*, n° 232, p. 66.
COULMAS Florian, *L'introduction de l'alphabet latin au Japon*, n° 234, p. 90.
COURVALIN Patrice, *La résistance des bactéries aux antibiotiques*, n° 232, p. 66.
COUSSOT Philippe, *Les coulées de boue*, n° 240, p. 62.
COUTANT Jacques, *Le laser Mégajoules*, n° 242, p. 76.
CRONIN James, *Les rayons cosmiques*, n° 233, p. 54.
DALMONT Jean-Pierre, *Des instruments à vent harmoniques*, n° 238, p. 78.
DANNEN Gene, *Les réfrigérateurs d'Einstein et de Szilard*, n° 233, p. 82.
DEAN Michael, *Pourquoi certaines personnes résistent au SIDA*, n° 240, p. 82.
DEHAENE Stanislas, *Comment notre cerveau calcule-t-il?*, n° 236, p. 50.
DELOUIS Bertrand, *La préparation d'un grand séisme*, n° 242, p. 42.
DICKINSON Mark, *Les premières galaxies de l'Univers*, n° 237, p. 52.
DIELS Jean-Claude, *Des lasers pour déclencher la foudre*, n° 240, p. 42.
DIETLER Michael, *L'art du vin chez les Gaulois*, n° 237, p. 68.
DORBATH Louis, *La préparation d'un grand séisme*, n° 242, p. 42.
DOYLE Brian, *Les voiles de course*, n° 239, p. 40.
DROHAN William, *Des animaux transgéniques produisent des médicaments*, n° 233, p. 70.
DUBOIS Paul, *Les concrétions des grottes enregistrent climats et séismes*, n° 231, p. 28.
DUCCIO MACCHETTO F., *Les premières galaxies de l'Univers*, n° 237, p. 52.
DUCROS Anne, *La migraine*, n° 239, p. 32.
DULOS Étiennette, *La chimie des formes*, n° 235, p. 34.
DUPRAZ Jacques, *Transferts rapides*, n° 235, p. 66.
DUSTMANN Cord-Henrich, *L'énergie des véhicules électriques*, n° 231, p. 64.

E – F

EL-BAZ F., *L'archéologie à distance*, n° 240, p. 76.
ELLENBERGER Michel, *L'invention retrouvée de la photographie*, n° 232, p. 36.
ELLMAN Jonathan, *Chimie combinatoire et nouveaux médicaments*, n° 236, p. 72.
EVANS Arthur, *Jules Vernes, visionnaire incompris*, n° 236, p. 94.
EVEN Catherine, *Les tambours liquides*, n° 234, p. 68.
EWEN John, *La synthèse ordonnée des matières plastiques*, n° 237, p. 76.
FAVRE-TROSSON Jean-Pierre, *Amiante : le dossier français*, n° 239, p. 54.
FELGNER Philip, *La thérapie génique sans virus*, n° 241, p. 66.
FISHMAN G., *Les sursauts gamma*, n° 239, p. 72.
FOLKERS Gerd, *Vers une conception rationnelle des médicaments*, n° 241, p. 40.
FORSYTH David, *La recherche d'images numériques*, n° 238, p. 86.
FRIEDMANN Theodore, *La thérapie génique, promesses et limites*, n° 241, p. 60.
FRIGERIO Alberto, *Les nouvelles formes galéniques*, n° 241, p. 114.

G – H

GAISSER T., *Les rayons cosmiques*, n° 233, p. 54.
GARATTINI Silvio, *Comment évaluer l'efficacité des médicaments*, n° 241, p. 128.
GAUTHIER-LAFAYE François, *Déchets nucléaires naturels*, n° 237, p. 82.
GILBERT Joël, *Des instruments à vent harmoniques*, n° 238, p. 78.
GIRRE Catherine, *Les médicaments et l'alcool*, n° 241, p. 138.
GOLD Philip, *Le corps, l'esprit et la maladie*, n° 241, p. 154.
GRACIA Diego, *Éthique et placebo*, n° 241, p. 146.
GRANDI Guido, *Les vaccins*, n° 241, p. 90.
GREGOROVA Ruzena, *Les poissons lumineux fossiles des Carpates*, n° 239, p. 66.
GREGORY J., *Le climat de demain*, n° 237, p. 38.
GRELLET Bertrand, *Les concrétions des grottes enregistrent climats et séismes*, n° 231, p. 28.
GULLISON Raymond, *Peut-on sauver les forêts tropicales?*, n° 236, p. 58.
GWYNNE Darryl, *Les offrandes nuptiales des insectes*, n° 240, p. 90.
HABICHT Gail, *Le système immunitaire des invertébrés*, n° 231, p. 46.
HARTMANN Dieter, *Les sursauts gamma*, n° 239, p. 72.
HASELTINE William, *Du gène au traitement*, n° 235, p. 28.
HAXBY W., *Les reliefs sous-marins*, n° 238, p. 42.
HEARST Marti, *Les interfaces de recherche*, n° 235, p. 57.
HEDIN Lars, *Poussières atmosphériques et pluies acides*, n° 232, p. 74.
HÉLÈNE Claude, *La synthèse combinatoire*, n° 241, p. 50.
HELMREICH Robert, *La gestion des erreurs humaines à bord d'un avion*, n° 237, p. 88.
HLADIK Claude Marcel, *Animaux et médicaments*, n° 241, p. 48.
HO Dora, *Thérapie génique et système nerveux*, n° 241, p. 80.
HOGAN C., *Le deutérium primordial*, n° 232, p. 44.
HORWITZ Alan, *Les molécules adhésives et la santé*, n° 237, p. 44.

J – K

JINSHI Fan, *Les trésors du bouddhisme chinois de Dunhuang*, n° 239, p. 58.
KAHLE Brewster, *Les archives d'un réseau actif*, n° 235, p. 68.
KAISER Dale, *La communication des bactéries*, n° 234, p. 76.
KARGEL Jeffrey, *Les changements climatiques sur Mars*, n° 231, p. 36.
KARL Thomas, *Le climat de demain*, n° 237, p. 38.
KAUFMAN S., *Leurres et gaspillage*, n° 234, p. 34.
KENNEDY John, *Comment les aveugles dessinent*, n° 233, p. 76.
KEPPER Patrick de, *La chimie des formes*, n° 235, p. 34.
KERGOMARD Jean, *Des instruments à vent harmoniques*, n° 238, p. 78.
KIM John, *Les superordinateurs analysent la turbulence*, n° 233, p. 46.
KLEINMAN Arthur, *Le fléau des maladies mentales*, n° 235, p. 80.
KOCH Alexander, *Les tombes impériales de la dynastie Tang*, n° 238, p. 70.
KREI Georg Arnold, *Du laboratoire à l'usine*, n° 241, p. 98.
KRESSE Georg-Burkhard, *Production de médicaments par génie génétique*, n° 241, p. 72.
KUBINYI Hugo, *Vers une conception rationnelle des médicaments*, n° 241, p. 40.
KWIAT Paul, *Voir sans regarder*, n° 231, p. 68.

L – M

LAHANA Roger, *Chimie combinatoire virtuelle*, n° 241, p. 56.
LANDRY Donald, *L'immunothérapie des cocaïnomanes*, n° 234, p. 64.
LANG Kenneth, *SOHO révèle les secrets du Soleil*, n° 238, p. 54.
LANSELLE Rainier, *Les concours mandarinaux*, n° 242, p. 50.
LANZA R., *Les xénotransplantations*, n° 239, p. 80.
LEAKEY Meave, *Les premiers hominidés en Afrique*, n° 238, p. 36.
LEDOUX Emmanuel, *Déchets nucléaires naturels*, n° 237, p. 82.
LESK Michael, *Les bibliothèques numériques*, n° 235, p. 49.
LIKENS Gene, *Poussières atmosphériques et pluies acides*, n° 232, p. 74.
LISS Tony, *La découverte du quark top*, n° 240, p. 68.
LITMAN Gary, *Les requins et l'origine de l'immunité des invertébrés*, n° 231, p. 52.
LOFTUS E., *Les faux souvenirs*, n° 242, p. 34.
LOSICK Richard, *La communication des bactéries*, n° 234, p. 76.
LOZOYA X., *La recherche des simples*, n° 241, p. 34.
LUBON Henryk, *Des animaux transgéniques produisent des médicaments*, n° 233, p. 70.
LYNCH Clifford, *La recherche d'informations*, n° 235, p. 44.
MADIGAN Michael, *Les organismes de l'extrême*, n° 236, p. 86.
MALIK Jitendra, *La recherche d'images numériques*, n° 238, p. 86.
MANGIONE-SMITH William, *Les ordinateurs configurables*, n° 238, p. 62.
MARIGNIER Jean-Louis, *L'invention retrouvée de la photographie*, n° 232, p. 36.
MARRS Barry, *Les organismes de l'extrême*, n° 236, p. 86.
MARTIN Christian, *HIPPARCOS, satellite chasseur d'étoiles*, n° 235, p. 70.
MASSIOU Hélène, *La migraine*, n° 239, p. 32.
MASSONNET Didier, *L'interférométrie radar par satellite*, n° 234, p. 48.
MATTHEWS Robert, *La science de la loi de Murphy*, n° 234, p. 100.
MCDOWELL Andrea, *La vie quotidienne dans l'Égypte ancienne*, n° 232, p. 86.

© POUR LA SCIENCE - N° 242 DÉCEMBRE 1997

MENDE Stephen, *La foudre au-dessus des nuages*, n° 240, p. 48.
MICHELET Daniel, *La synthèse combinatoire*, n° 241, p. 50.
MIGNARD François, *HIPPARCOS, satellite chasseur d'étoiles*, n° 235, p. 70.
MILLER Ron, *Jules Vernes, visionnaire incompris*, n° 236, p. 94.
MOIN Parviz, *Les superordinateurs analysent la turbulence*, n° 233, P. 46.
MORRISON A., *Progrès et sécurité*, n° 234, p. 37.
MOSSMAN Brooke, *Grandeur et décadence de l'amiante*, n° 239, p. 48.
MUKERJEE Madhusree, *L'évolution de l'expérimentation animale*, n° 234, p. 42.

N – O

NELSON Robert, *Mercure, la planète oubliée*, n° 242, p. 86.
NÉNON Jean-Pierre, *Guêpes et apprentissage*, n° 238, p. 48.
NICHOLLS N., *Le climat de demain*, n° 237, p. 38.
NORI F., *La musique des sables*, n° 242, p. 94.
O'BRIEN Stephen, *Pourquoi certaines personnes résistent au SIDA*, n° 240, p. 82.
OUDET Bruno, *Le multilinguisme*, n° 235, p. 55.

P – R

PACKER Craig, *La coopération chez les lions*, n° 237, p. 60.
PHILIP Hervé, *La préparation d'un grand séisme*, n° 242, p. 42
PIERANSKI Pawel, *Les tambours liquides*, n° 234, p. 68.
PINTER Nicholas, *Comment l'érosion construit les montagnes*, n° 236, p. 78.
PLUNKETT Matthew, *Chimie combinatoire et nouveaux médicaments*, n° 236, p. 72.
PORTER Stuart, *Le pelliculage*, n° 241, p. 136.
POTIER Pierre, *La corne d'abondance est encore pleine*, n° 241, p. 30.
PRATSON L., *Les reliefs sous-marins*, n° 238, p. 42.
PUSEY Anne, *La coopération chez les lions*, n° 237, p. 60.
RAPPUOLI Rino, *Les vaccins*, n° 241, p. 90.
REID John, *Peut-on sauver les forêts tropicales?*, n° 236, p. 58.
RESNICK Paul, *Le filtrage d'informations*, n° 235, p. 52.
RICE Richard, *Peut-on sauver les forêts tropicales?*, n° 236, p. 58.
RIEDERER Peter, *La maladie de Parkinson*, n° 233, p. 60.
ROWAN Andrew, *L'expérimentation animale : utilité et éthique*, n° 234, p. 33.

S – T

SAKIZ Édouard, *Le RU 486, principe actif socialement contesté*, n° 241, p. 122.
SAPOLSKY Robert, *Thérapie génique et système nerveux*, n° 241, p. 80.
SCHWARTZ Laurent, *Le petit père Hadamard*, n° 233, p. 88.
SCHWARZBACH David, *L'Iran construit-il des armes nucléaires?*, n° 238, p. 32.
SENTMAN Davis, *La foudre au-dessus des nuages*, n° 240, p. 48.
SEYMOUR Roger, *Des plantes à sang chaud*, n° 235, p. 90.
SHAYWITZ Sally, *La dyslexie*, n° 231, p. 76.
SHOLTZ Paul, *La musique des sables*, n° 242, p. 94.
SIEGEL Richard, *Les nanomatériaux*, n° 232, p. 58.
SMIL Vaclav, *Engrais et démographie*, n° 239, p. 86.
SMITH Michael, *La richesse des provinces de l'Empire aztèque*, n° 242, p. 66.
SOLOMON Anne, *L'art rupestre d'Afrique australe*, n° 231, p. 84.
SPERLING Daniel, *Les véhicules électriques*, n° 231, p. 58.
STAHLKOPF Karl, *Des lasers pour déclencher la foudre*, n° 240, p. 42.
STEFIK Mark, *Les systèmes sécurisés*, n° 235, p. 62.
STERNBERG Esther, *Le corps, l'esprit et la maladie*, n° 241, p. 154.
STIEGLER Gabor, *Production de médicaments par génie génétique*, n° 241, p. 72.
STROM Robert, *Les changements climatiques sur Mars*, n° 231, p. 36.
SWORDY S., *Les rayons cosmiques*, n° 233, p. 54.
TAMBOURIN Pierre, *L'expérimentation vitale*, n° 234, p. 40.
TATTERSALL I., *Les premiers exodes*, n° 236, p. 40.
TEUTSCH Georges, *La chimie médicinale*, n° 241, p. 106.
THOMAS Guy, *Les médicaments et l'alcool*, n° 241, p. 138.
TIPTON Paul, *La découverte du quark top*, n° 240, p. 68.

V – W

VELANDER William, *Des animaux transgéniques produisent des médicaments*, n° 233, p. 70.
VILLASENOR John, *Les ordinateurs configurables*, n° 238, p. 62.
WALKER Alan, *Les premiers hominidés en Afrique*, n° 238, p. 36.
WALLACE Douglas, *ADN mitochondrial, maladies et vieillissement*, n° 240, p. 52.
WEBB Barbara, *Un grillon robot*, n° 232, p. 80.
WEINFURTER H., *Voir sans regarder*, n° 231, p. 68.
WESCOTT Eugene, *La foudre au-dessus des nuages*, n° 240, p. 48.
WIKLIND Tommy, *Les télescopes gravitationnels*, n° 242, p. 58.
WILENSKY Robert, *La recherche d'images numériques*, n° 238, p. 86.

Y – Z

YOUDIM Moussa, *La maladie de Parkinson*, n° 233, p. 60.
ZEILINGER Anton, *Voir sans regarder*, n° 231, p. 68.
ZHAO Xin Miao, *Des lasers pour déclencher la foudre*, n° 240, p. 42.
ZINKERNAGEL Rolf M., *Le soi, le non-soi et les virus*, n° 236, p. 64.

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-46-34-21-42
http://www.pourlascience.com

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenet, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel et Christelle Dumas. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Alain Chêne, Bettina Debû, Pierre Évesque, François Garaude, Évelyne Host-Platret, Yves Langevin, Philippe Machetel, Bernard Moreau, Claude Olivier, Guy Paulus.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : Joachim Rosler. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : Robert Biewen, Anthony Degutis.

PUBLICITÉ France
Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois,
8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 46 34 09 12.
Télex : LIBELIN 202978F.
Télécopieur : 01 43 25 18 29
Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62
SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Grémillon.
SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP
Henri Gibelin.
DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE
Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada
Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay
Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

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

© Pour la Science S.A.R.L.
Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).
Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5614 – Décembre 1997 – N° d'édition 7242-01 – Commission paritaire n° 59713 du 17-10-77 – Distribution : NMPP
ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur J97/61 734P – Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.