



■ POUR LA

Pour la Science

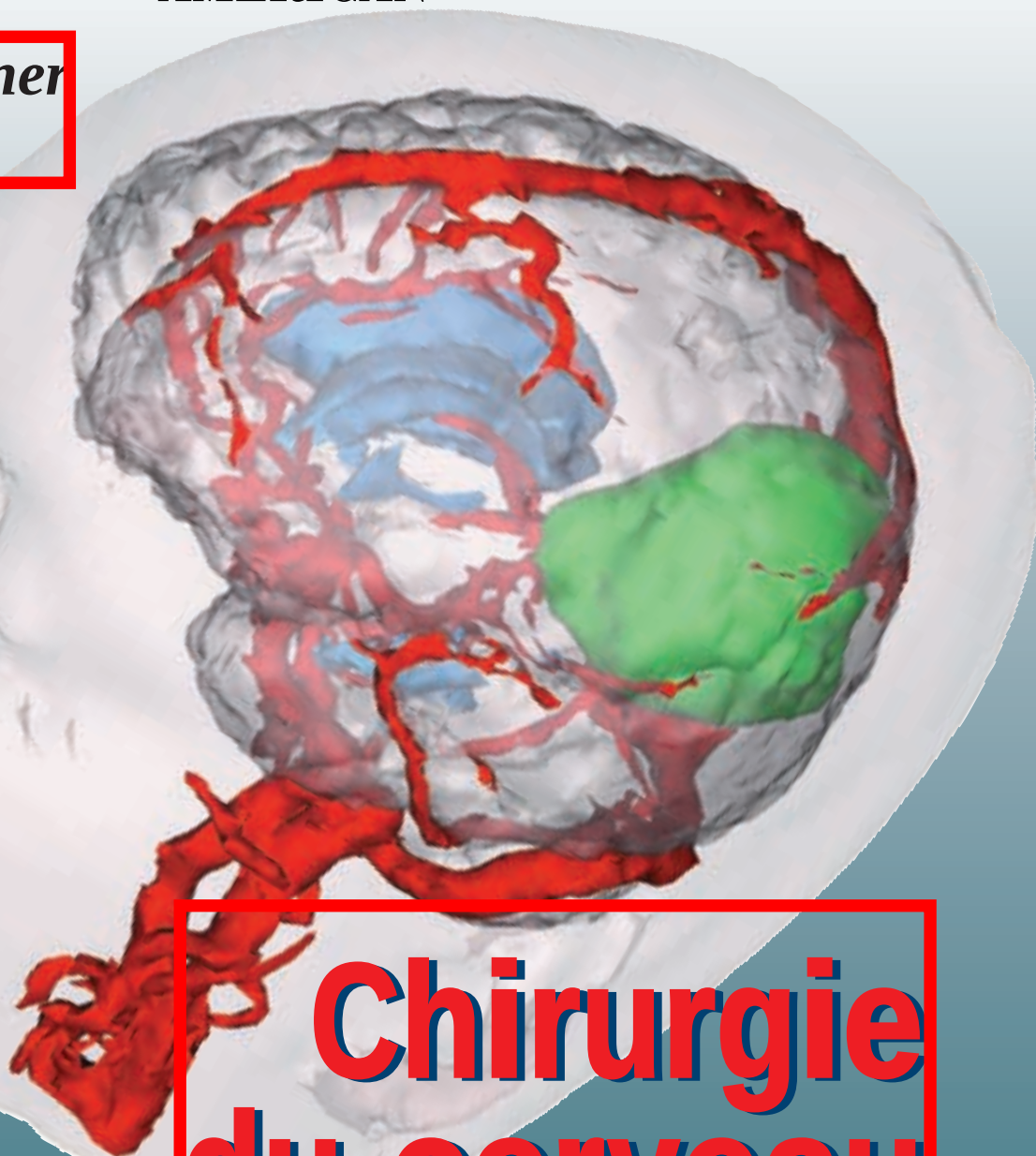
SCIENCE

Juillet 1999

édition française de

SCIENTIFIC
AMERICAN

*Quand le scanner
aide le scalpel*



**Chirurgie
du cerveau**



BLOC-NOTES

de Didier Nodon

5

JEU-CONCOURS

Pentagonophobie

par Pierre Tougne

6

TRIBUNE DES LECTEURS



POINT DE VUE

Qui a peur de Claude Allègre?

par Henri Korn, Gérard Megie et Pierre Rouillard

8



La science et l'Europe

par Francis

9



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Internet avant la lettre

par Paul B...

12



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Comment le sel modifie le goût

par Hervé T...

16



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ Cécité et vieillissement ■ Météo dans les grottes

■ Mosaïque préhistorique ■ Météorites

■ Éponges vitreuses ■ Horloge biologique

■ Relique de tectonique ■ Le jongleur d'eau

■ Origine extraterrestre?

20



IDÉES DE PHYSIQUE

Pourquoi le Soleil brille-t-il?

par Roland Behoucq

100



VISIONS MATHÉMATIQUES

Grilles toriques

et fabrication de briques

par Ian Stev...

102

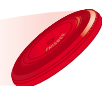


LOGIQUE ET CALCUL

Cette phrase contient exactement

par Jacques P...

104



SAVOIR TECHNIQUE

Le vol du frisbee

par Louis Bloomfield

109



ANNALES DE LIVRES

■ Les volcans, de Claude Jaupart

■ L'impact des planètes, d'Alfred Vidal-Madjar

■ Looking for Earths, d'Alan Boss

■ Extrasolar Planets : the Search for New Worlds, de Stuart Clark

■ Tais-toi et mange, de Guy Paillotin et D. Rousset

■ La mystique de l'ADN, de Dorothy Nelkin et Susan Lindee

■ La part des gènes, de Michel Morange

110

La multiplication des neurones chez l'adulte

3

par Gerd Kempermann
et Fred Gage

Contrairement à ce qui était admis, des neurones sont produits chez l'homme même à l'âge adulte. On espère utiliser cette capacité du cerveau pour mieux traiter les maladies neurologiques.



Tremblements de terre et archéologie

3

par Hervé Phipp
et Arkadi Karakhanian

La sismologie rencontre l'histoire : lors des recherches sur les séismes anciens, les géologues ont découvert la ville de Behoura, en Arménie.



La datation des objets en bois

42

par Gottfried Matthaes

Une nouvelle méthode, simple, précise et fiable permet de déterminer l'âge de meubles, de panneaux peints, de sculptures et autres objets en bois.

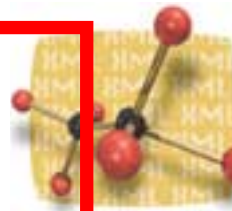


Le langage XML

48

par Jon Bosak et Tim Bray

Le réseau internet s'est considérablement développé grâce à la mise au point de systèmes «hyper-texte» qui gèrent les images, les textes, les sons. Le langage XML accélère ce développement.



Cônes et toxines

56

par Frédéric Le Gall,
Philippe Favreau
et Georges Richard

Pour paralyser leurs proies, ces coquillages utilisent des venins qui contiennent d'innombrables toxines dont l'action est ciblée.



Lady Ada et le premier ordinateur 64

par Eugène Eric Kim
et Betty Alexandra Toole

La collaboration entre Ada King, comtesse de Lovelace, et le pionnier de l'informatique Charles Babbage a conduit à une publication qui fit date sur la manière de programmer le premier calculateur automatique.



La chirurgie assistée par ordinateur 70

par Eric Gimson, Ron Kikinis,
Ferenc Jösz et Peter Black

Les chirurgiens utilisent la réalité virtuelle pour exciser des tumeurs avec une meilleure précision.



La culture des îles Andaman 78

par Sita Venkateswar

Les îles Andaman, dans l'océan Indien, abritent encore des chasseurs-cueilleurs traditionnels. Pour combien de temps?



Les oscillations de Bloch 84

par Maxime Buhar
et Christophe Salmon

Dans un champ électrique uniforme, les électrons d'un cristal ont un mouvement oscillant. Cet effet, prédit théoriquement dans les années 1920, n'a été détecté que récemment.



La couleur des oiseaux 92

par Maurice Pomarède

L'absorption de la lumière par les plumes et les interférences de la lumière réfléchie sur leurs structures engendrent les vives couleurs du paon, de la perruche, du colibri...



ÉDITORIAL

La rumeur plausible

La rumeur court et s'amplifie à mesure qu'elle s'éloigne de sa source et que sa vérification devient difficile. Les exemples de fausses légendes pullulent : les Égyptiens auraient utilisé une cordelette avec des nœuds aux points de longueurs 3, 4 et 5 pour former un angle droit (cette affirmation n'est pas dramatique, mais elle n'est pas attestée) ; une vieille dame aurait séché son caniche dans un four micro-ondes ; les égouts de New York seraient infestés de crocodiles encombrants jetés par leurs propriétaires ; des films d'assassinats associés à des sévices sexuels seraient des tournages de la D. A. L. ; les reins et cornées, ont défrayé la chronique il y a quelques années : cette dernière rumeur n'a pas été sans conséquences, car les dons d'organes légaux et utiles, ont diminué de 90 pour cent en Colombie après la divulgation de prétendus trafics. La réaction du public à la rumeur a coûté de nombreuses vies.

Le bruit court actuellement que des œuvres d'art anciennes sont à vendre à bas prix sur les marchés de l'Est et du Sud-Est de l'Europe. On se rue sur le marché de Budapest pour acquérir à bas prix tableaux et icônes. Les experts auraient pu les détromper : la grande majorité des icônes sont des contrefaçons récentes, et des tests simples permettent de vérifier leur authenticité (voir *La datation des objets en bois*, page 42).

La difficulté est que ces rumeurs sont plausibles. Comment les combattre ? Par une rumeur opposée ? Le statut de la réalité s'estompe, d'autant que des tendances philosophiques en *isme* (relativisme et autres) tendent à propager l'idée que la vérité n'est plus objective, mais dans l'œil de l'observateur. Il n'y aurait pas de réalité, mais des interprétations individuelles des faits.

La vérité ne serait-elle rien d'autre qu'un sentiment ? L'objectivité scientifique, philosophique, mais l'affirmation qu'une image mentale personnelle constituerait la réalité est outrée. L'objectivité scientifique pourrait souvent statuer entre faits et opinions, mais des tendances mettent en doute ses possibilités. D'où une acceptation renforcée des rumeurs.

Philippe BOULANGER

Visions intérieures

Un géomètre aveugle ! Est-ce concevable ? Oui. Plus étonnant, le cas n'est pas unique. Au cours de l'histoire, apparaissent régulièrement des géomètres aveugles. Ce phénomène n'a pas manqué d'intriguer. Sans expliquer tout, la remarque suivante, due au mathématicien Alexei Sosinsky, est néanmoins intéressante. Les images visuelles se forment sur la rétine, laquelle est à deux dimensions : tout ce que nous voyons, nous le ramenons par ce fait à deux dimensions. Cela nous handicape pour percevoir l'espace dans ses trois dimensions. Les aveugles n'ont pas cette difficulté. Ils peuvent ainsi mieux « voir » dans l'espace que ceux qui voient. Ainsi entraînés, ils conçoivent mieux que les voyants les dimensions supérieures.

« Quand l'œil du corps s'éteint, l'œil de l'esprit s'allume », disait Victor Hugo.

Bonnes conduites ?

Selon une enquête, 80 pour cent des conducteurs français s'estiment bons. Ce résultat serait, selon les commentateurs avisés, désespérant : des gens si contents d'eux ne sont pas disposés à faire des efforts pour s'améliorer, et les routes resteront aussi mal gérées.

Raisonnement peu convaincant. On entend que si ces 80 pour cent étaient effectivement mauvais, la situation serait tolérable. Pourtant, il reste 20 pour cent de chauffards avoués, soit quelques millions de dangers publics. La vitesse d'un troupeau de bisons, dit-on, est celle du plus

lent des bisons : de même, le niveau de sécurité sur les routes est déterminé par les conducteurs les moins sages. Ceux qui se croient prudents à tort me semblent plus susceptibles de faire un effort, pourvu qu'on les aide à prendre conscience de leur erreur, que les 20 pour cent qui narquent la sécurité.

Le siècle avait-il deux ans ?

Combien de temps dure un siècle ? Question plus délicate qu'il n'y paraît. Le cours d'histoire de Malet et Isaac écrit : « C'est Voltaire qui, le premier, a employé l'expression "siècle de Louis XIV" en 1751. En fait, ce "siècle" ne compte que cinquante-quatre années (1661-1715). D'ailleurs, le "siècle d'Auguste" ne comprend que quarante-trois ans (29 av. J.-C. à 14 ap. J.-C.) et le "siècle de Périclès" encore moins (environ 450 à 409 av. J.-C.). »

ajoutons que certains historiens – qui vont vite en besogne – considèrent que le xx^e siècle, commencé en 1914, s'est achevé avec la chute du mur de Berlin en 1989 ; si c'est les sur, le xx^e siècle a donc duré soixante-quinze ans. De Périclès à nos jours, nous disposons, pour une fois, de renseignements nombreux, fiables et portant sur la longue durée. Une conclusion s'impose : la tendance lourde est à l'allongement de

pour extrapoler, et déterminer dès aujourd'hui combien de temps durera le xxi^e siècle ? D'autre part, l'occasion serait-elle donnée à l'humanité de connaître un siècle dont la durée s'exprimerait par un nombre rond, par exemple pile cent ans ?

Décomptes mathématiques

Les bons auteurs savent, en quelques lignes, susciter une foule d'interrogations chez le lecteur. Voici un exemple. Le nombre de mathématiciens actifs en recherche en 1999 est de cent mille», écrit le mathématicien Jean-Pierre Kahane. Au même moment, son collègue mathématicien Jean-Pierre Bourguignon écrit : « Le nombre de mathématiciens actifs en recherche dans le monde est aujourd'hui de l'ordre de cinquante mille. »

Il s'agit aussitôt d'urgences de grandes et belles questions. Les affirmations des deux Jean-Pierre sont-elles contradictoires, ou peut-on considérer que cent mille est de l'ordre de cinquante mille ? Jettent-elles une ombre sur la réputation de rigueur des mathématiciens et d'exactitude des mathématiques ? Permettent-elles d'affirmer que J.-P. Bourguignon est deux fois plus élitiste que J.-P. Kahane ? Prouvent-elles que la notion de mathématicien actif est trop vague pour qu'il y ait un sens à compter les éléments de cet ensemble ? Plus vertigineux encore : il n'y a pas plus loin de cinquante mille à zéro, que de cinquante mille à cent mille : approximation pour approximation, peut-on aller jusqu'à envisager l'hypothèse que le nombre de mathématiciens réellement actifs en recherche de par le monde soit égal à zéro ?

Ordre d'eau

Voici trois renseignements éparés dont la connotation se révèle fâcheuse.

1. Le nom « Aquitaine » signifie « pays des eaux » (latin *aqua*).
2. « Ne boivent que les êtres dont l'eau est au moins une composante. Si bien que l'on peut regarder l'univers actuel comme le combat de l'eau, qui fut désunie, pour se réunir » (Louis Scutenaire, *Mes Inscriptions*, 1945-1963).
3. La capitale de l'Aquitaine est Bordeaux.

Que le pays des eaux fasse à Bordeaux l'honneur de la choisir comme capitale ne peut avoir qu'une signification : les eaux, désunies sur la surface de l'Aquitaine, ont élu précisément cette ville pour se réunir. Capitale des eaux, Bordeaux est aussi, n'en déplaise aux Burgondes, capitale du vin. Un soupçon terrible surgit. Le vin de Bordeaux serait-il obtenu à partir d'un soigneux mélange d'eaux de l'Aquitaine : Gironde, bassin d'Arcachon, pluie, océan... ?

Scripta volant, Internet manet

Une romancière expliquait, à la radio, pourquoi elle tenait à mettre ses œuvres sur l'Internet. Les livres de papier durent, au mieux, six mois en librairie avant d'être retournés à l'éditeur, lequel les fera pour la plupart pilonner. Les textes sur l'Internet, sont éternels. Auront-ils plus de lecteurs pour autant ? Ce n'est pas sûr. Mais soit : quitte à ne pas être lu, l'idée que cet état durera jusqu'à la fin des temps a quelque chose de consolant. Le pire sort pour un auteur est d'être lu, puis oublié. Perdurer à jamais dans la non-existence est moins douloureux que cesser d'exister !

Seulement, je ne crois pas que l'Internet durera si longtemps. Rien n'est éternel, sauf le besoin des hommes de confier leurs œuvres à un support censé échapper à la mort. Dernière matérialisation en date de cette pulsion archaïque, l'Internet ne réussira pas là où l'écriture sur parchemin et l'architecture monumentale ont échoué ! Combien d'œuvres à jamais perdues ?

Pour l'instant, je ne vois qu'une question nouvelle. On appelait « fonds de tiroirs » les œuvres manquées ou les ébauches délaissées. Les auteurs, désormais, n'abandonnent plus le fruit de leurs veilles à un papier dans un tiroir, mais à une mémoire d'ordinateur. Par quelle locution aussi expressive faut-il remplacer l'expression « fond de tiroir » ?

JEU-CONCOURS N° 61

PIERRE TOUSSAIE

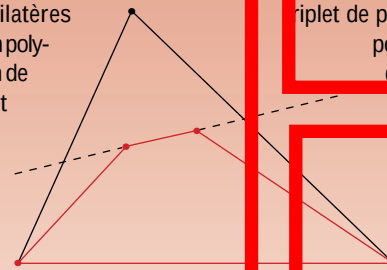
Pentagonophobie

Soient trois points non alignés dans le plan, donc un triangle. On peut s'interroger : combien de points peut-on ajouter tels que : (a) trois points ne soient jamais alignés, (b) aucun des quadrilatères formés ne soient convexes ? Un polygone convexe est tel qu'aucun de ses côtés ou son prolongement ne coupe un autre côté autrement que par ses extrémités. On peut évidemment ajouter un point, par exemple en le plaçant à l'intérieur du triangle formé par les trois

côtés coupés sera convexe. L'examen des autres cas est laissé au lecteur.

L'objet du concours sera d'éviter un pentagone convexe : combien de points (aucun triplet de points n'étant aligné) pouvez-vous dessiner dans le plan, de telle sorte qu'aucun des

pentagones formés ne soit convexe ? Le résultat sera donné sous la forme d'une figure, la démonstration



points. En revanche, on ne peut ajouter un deuxième point sans former un quadrilatère convexe. Ainsi, si l'on ajoute ce deuxième point à l'intérieur du triangle de départ, la droite passant par les deux points ajoutés coupe deux côtés du triangle (autrement qu'en un sommet, auquel cas ces trois points seraient alignés), et le quadrilatère constitué de ces deux points et des extrémités non communes des

que c'est le maximum (trop difficile) n'est pas demandée

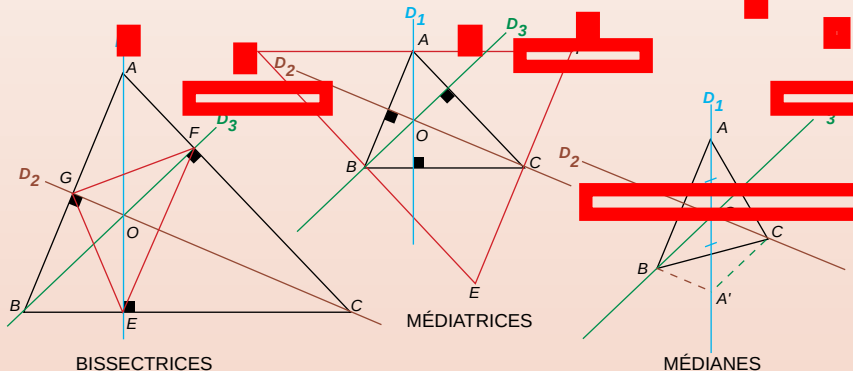
Envoyez vos réponses aux questions sur cette postale à Pour la Science, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses exactes reçues pendant le mois de juillet 1999, dix gagnants tirés au sort recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N° 59

Il existe bien des façons de construire ces triangles. La plus simple me semble de partir du triangle ABC , dont D_1 , D_2 et D_3 sont les hauteurs. Pour les bissectrices, un triangle cherché n'est autre que celui formé par les pieds des hauteurs E, F, G , appelé triangle orthique (voir la figure). En effet, montrons, par exemple, que la droite D_1 est bissectrice de l'angle GEF . Les quadrilatères $EOFG$ et $BGFC$ sont inscriptibles dans les cercles de diamètres respectifs BC et BC (car $BGO = OEB = OEC = OFC = OCF = 90$ degrés). On a donc les égalités d'angles inscrits $GBG = GEO$, $OEF = OCF$ et $GBG = OCF$, d'où $GEO = OEF$.

Pour les médianes, il suffit de tracer par A , B et C , les parallèles à respectivement BC , CA et AB , qui se coupent en D , E et F (voir la figure). En effet, A est le milieu de DF , car $ABCF$ et ADB sont des parallélogrammes et, par conséquent, $DA = BC = AF$ et, d'autre part, EA est orthogonale à DF , donc D_1 est bien une médiatrice du triangle DEF , etc.

Pour les médianes (qui n'étaient pas demandées), c'est tout aussi facile. On prend un point A sur D_1 , son symétrique par rapport à O et l'on trace, par ce point, une parallèle à D_2 qui coupe D_3 en B et une parallèle à D_3 qui coupe D_2 en C . Le triangle ABC répond à la question.



Comptabilité génétique

L'article sur L'hypertension chez les Noirs d'Amérique (voir *Pour la Science*, avril 1999) indique que «Les Noirs américains et nigériens qui ont participé à l'étude avaient environ 75 pour cent de leur patrimoine génétique commun avec les Nigériens. En outre, il est couramment admis que l'homme et le chimpanzé partagent 99 pour cent de leur patrimoine génétique. Que représentent ces valeurs? On pourrait penser que les Noirs américains et les Nigériens présentent plus de différences génétiques entre eux qu'il n'y en a entre les deux espèces!

Julien GOZARD, Amilly

Réponse de Laurence Tiret, de l'INSERM

Quand on parle de 99 pour cent d'homologie entre le génome de l'homme et celui du chimpanzé, cela signifie que, lorsque l'on compare les deux génomes par des techniques d'hybridation de l'ADN, on trouve environ un pour cent de nucléotides (les briques élémentaires de l'ADN) qui diffèrent. En revanche, 75 pour cent de patrimoine génétique commun entre Nigériens et Noirs américains signifie que les Noirs américains ont 75 pour cent de leurs gènes qui proviennent d'ancêtres communs avec les Nigériens et 25 pour cent de leurs gènes qui proviennent du mélange avec d'autres populations.

Sakharov et Tchernobyl

Genndy Gorelik évoque en seulement quelques lignes les dernières années de la vie d'Andreï Sakharov (voir *La métamorphose d'Andreï Sakharov*, *Pour la Science*, mai 1999). Quelques mois avant sa mort, et quelques semaines après la catastrophe de Tchernobyl, Sakharov a été rapatrié à Moscou, sur ordre personnel de Mikhaïl Gorbatchev, alors secrétaire général du Parti communiste d'URSS, afin de reprendre ses travaux sur les contaminations radioactives. C'est le savant, avant le militant des droits de l'homme, qui était ainsi réhabilité.

Tchernobyl aurait d'ailleurs servi plus largement de déclencheur à la libéralisation politique de l'URSS. À l'été 1988, M. Gorbatchev donne une conférence de presse à Varsovie, où il motive sa politique de réformes par les dysfonctionnements du système soviétique dont il a été témoin. À un journaliste qui lui demande pourquoi les réformes arrivent seulement, alors que

les dysfonctionnements sont connus depuis longtemps, il répond : «Parce que nous avons eu Tchernobyl!»

Michel BOURGUET, Mulhouse

Couche actuelles

Au XVIII^e siècle, Benjamin Franklin mesurait la taille des molécules à l'aide d'une couche d'huile déposée sur de l'eau (voir *La taille des molécules*, *Pour la Science*, mai 1999). Au XX^e siècle, l'automobile offre un moyen inédit d'estimer cette taille. On change de pneumatique tous les 50 000 kilomètres environ, après avoir usé neuf millimètres de gomme (l'épaisseur des sculptures). Si l'on suppose que la quantité de gomme déposée est identique à chaque tour de roue, l'épaisseur de la couche de gomme laissée sur le sol est, pour une roue de 60 centimètres de diamètre, 0,3 nanomètre (9 millimètres $\times \pi \times 60$ centimètres/50 000 kilomètres), soit l'ordre de grandeur d'une molécule. Conclusion : un pneu laisse sur la route une couche monomoléculaire de gomme!

Christophe DUPRAZ, Paris

De toutes les couleurs

Quelle n'a pas été ma surprise de lire que l'arc-en-ciel présente sept couleurs (voir *Bleu céleste*, *Pour la Science*, mai 1999)! Le nombre sept est, bien sûr, arbitraire. Pourquoi Newton l'a-t-il choisi, après avoir, dans son *experimentum crucis*, montré l'étalement du spectre de la lumière blanche? Six auraient suffi, mais le nombre de notes de la gamme, ou l'importance accordée au nombre sept dans son entourage maçonnique, favorisait l'invention *ad hoc* de l'indigo pour compléter la palette.

Claude LÉON, Paris

Xénogreffes?

Jean-Louis Fischer évoque (voir *Les premières xenogreffes humaines*, *Pour la Science*, mai 1999) «Un porc transgénique modifié pour ne plus exprimer les antigènes de porc qui déclenchent le rejet chez l'homme.» Pourquoi se donner tant de peine? La compatibilité va de soi : il y a en tout homme un cochon qui sommeille. Quant aux femmes, la solution a été trouvée par un grand homme qui, bouquet à la main, attendait en vain l'arrivée de sa bien-aimée : il y a en toute femme un lapin qui sommeille.

Pierre BLANQUET, Paris

Drac de bec

Outre les kangourous, de nombreuses espèces australiennes disparues étaient carnivores, selon Stephen Wroe (voir *Les kangourous carnivores*, *Pour la Science*, juin 1999). Mais l'encadré intitulé «Un calao tueur» propose que, au vu du volume de son bec et de la musculature associée, l'oiseau *Bulcockia plani* aurait été carnivore. Le calao, que l'on trouve dans les forêts tropicales d'Afrique et d'Asie, a un bec encore plus gros, mais n'est pas réputé carnivore : sa musculature est-elle insuffisante?

J. F. POROT, Saint-Geoire en Valdaine

Réponse de Céline Mourer-Chauviré

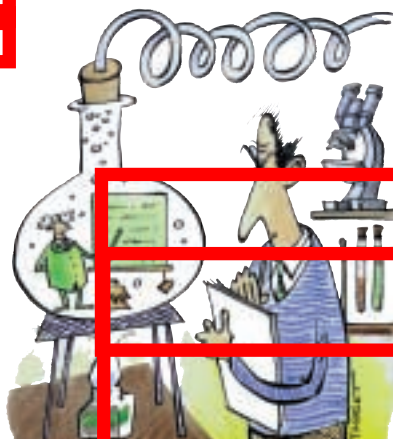
Les hypothèses sur le régime alimentaire des oiseaux tiennent compte aussi de l'épaisseur des os du bec. Celui des calaos est très gros et très fort et est couvert d'un étui corné, mais les os qui sont à l'intérieur, le pré-maxillaire et la mandibule, sont minces et légers, presque entièrement creux : lorsque l'on soustègne un crâne de calao auquel la partie cornée a été ôtée, on est stupéfait de sa légèreté. Toutefois, la plupart des espèces de calaos sont omnivores. Certaines sont entièrement carnivores, se nourrissant majoritairement d'insectes, mais aussi de petits vertébrés. La plupart des espèces forestières se nourrissent surtout de fruits, mais consomment aussi de petits animaux, particulièrement durant la période de reproduction.

C. M.-C., Université Claude Bernard Lyon 1

Causalité abusive

L'écoulement nocturne de leur chambre rendrait les enfants myopes (voir *Extinction des feux*, *Brèves*, *Pour la Science*, juin 1999)! Je ne conteste pas la corrélation établie entre l'illumination et la myopie, mais y a-t-il pour autant un lien de cause à effet? Myope moi-même, je sais que, la nuit, toutes les formes sont plus confuses. Cela s'explique par la plus grande ouverture de l'iris. En tant que père, je sais que si les enfants demandent une lumière dans leur chambre, c'est parce qu'ils ont peur la nuit. Conclusion, si 48 pour cent des enfants dormant avec la lumière sont myopes, et seulement 9 pour cent de ceux qui dorment dans l'obscurité, cela prouve que la déformation des images vues par les enfants myopes dans la pénombre peut leur faire peur. N'est-ce pas une explication plus simple que celle qui dit qu'une veilleuse modifierait le développement de la vue?

Jean-Luc OTTINGER, Bruxelles



Qui a peur de Claude Allègre?

HENRI KORN - GÉRARD MEGIE - PIERRE ROUILLARD

Les quatre objectifs d'une réforme de la recherche et de l'enseignement supérieur.

Les auteurs de la science française connaissent fort bien ses faiblesses, les périls qui la menacent et les réformes qui s'imposent. Toutefois, un des traits les plus surprenants de notre pays est qu'il est inconvenant d'exprimer en public ce dont chacun convient en privé. Est-ce si grave de bousculer, même dans l'intérêt de tous, habitudes et notabilités? C'est ce que l'on pourrait croire après avoir entendu les clameurs de ceux qu'inquiètent les propositions d'un ministre qui est pourtant un scientifique de premier plan. Confondus par une telle montée de l'irrationnel, ceux qui sont d'accord avec lui se sont encore peu exprimés. Que faut-il faire?

D'abord, rapprocher les organismes scientifiques et les Universités. Les chercheurs statutaires des organismes publics, tels le CNRS ou l'INSERM, n'ont, contrairement à ce qui se passe dans nombre de pays industrialisés, aucune obligation d'enseignement. Cette configuration est funeste tant pour l'université dont la vocation universelle est ainsi battue en brèche, que pour les chercheurs eux-mêmes, qui ne peuvent transmettre leur savoir et le caractère exaltant de leur passion aux plus jeunes. De ce fait, la séparation de la recherche et de l'enseignement nuit à toute la société, qui est largement sollicitée par les sirènes de l'antiscience.

De surcroît, il n'est pas donné à chacun de rester un chercheur productif toute sa vie, et l'absence de passerelles avec l'Université ou l'industrie coupe toute possibilité de reconversion. Certes, bien des népotismes restent à vaincre, et des tâches à répartir. On doit améliorer les conditions d'accueil et d'échanges, afin de rendre aux maîtres de conférences le temps nécessaire à la conduite de leur recherche. Mais est-ce trop demander à tous que de s'atteler à cette œuvre? L'Université est riche de talents, elle est un irremplaçable vivier pour la science du XXI^e siècle.

Il faut aussi évaluer mieux les personnels et les laboratoires. On sait fort bien à quelles règles absolues doit se plier une recherche de haut niveau : goût du risque ; imagination ; rigueur expérimentale, qui, dans les sciences exactes, consiste en une confirmation permanente du modèle avec la réalité qu'il prétend décrire ; jugement critique permanent de sa propre activité comme de celle de ses rivaux. L'évaluation de ces qualités doit être élargie à tous, quel que soit leur grade et leur niveau de responsabilité puisque, de la science, ils ont accepté non seulement les servitudes, mais aussi les honneurs.

Or la communauté scientifique française ne peut, malgré tous ses efforts, assurer toujours un jugement impartial par les pairs : l'indépendance de jugement se heurte trop souvent à l'absence de confidentialité, inévitable dans une communauté restreinte et, souvent, partagée en groupes de pression. En outre, notre pays manque d'experts pour apprécier le bien-fondé de recherches dans des domaines émergents ou qui associent des compétences de divers champs de savoir. Dans un tel contexte, proposer une évaluation par petites équipes pour aider les meilleurs et réorienter ceux qui ne le sont pas encore, et qui fasse appel à des experts internationaux, est une garantie contre la complaisance et un impératif pour la survie des laboratoires.

Il faut, troisièmement, responsabiliser les jeunes chercheurs et leur donner leur chance. La structure des laboratoires français est telle que, même après avoir été recruté dans un organisme public, un jeune scientifique doit souvent attendre des années avant de créer son équipe et d'avoir un thème qui lui soit propre. Après sa thèse, il doit compléter sa formation lors d'un stage postdoctoral qui s'effectue obligatoirement à l'étranger. C'est ainsi que des milliers de jeunes talents sont aujourd'hui exilés, en particulier aux États-Unis, et que les plus qualifiés sont sollicités par des conditions de travail beaucoup plus attrayantes

que celles qui sont offertes en France. Or ces jeunes scientifiques sont déjà compétents dans des domaines dont nous avons grand besoin, car encore mal ou non représentés, dans l'enseignement approprié, ou aux charnières de plusieurs disciplines (mathématiques, physique, biologie, chimie, informatique, santé publique). Est-il excessif d'envisager une actualisation des règles administratives qui permettent d'intégrer ces forces vives à notre potentiel de recherche?

Il faut enfin rééquilibrer les disciplines prioritaires. Depuis des décennies, la répartition des moyens est restée la même entre les différents secteurs de la recherche, malgré l'apparition de nouveaux champs de la connaissance et le progrès inégal des disciplines. La biologie et la génétique moléculaires, par exemple, ont bouleversé les sciences de la vie. Elles permettent de mieux comprendre le développement, le fonctionnement et la pathologie des êtres vivants, et de développer une bioingénierie, en agroalimentaire et en médecine, qui voit désormais à sa portée les maladies jugées intraitables il y a seulement quelques années. L'essor des neurosciences nous permet d'explorer le fonctionnement du cerveau et de la pensée. Enfin, également proches du domaine du vivant, les techniques de l'informatique et de la communication, centrées autour de l'informatique, transforment chaque jour notre vie, notre vision du monde et notre économie, au même titre que les sciences de l'environnement et les sciences humaines.

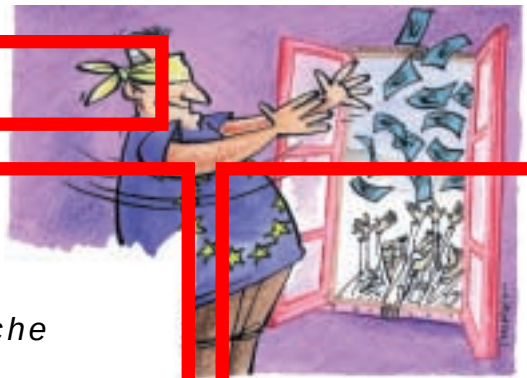
Est-il inconvenant d'afficher pour ces secteurs qui décideront demain de notre place dans le monde, et sans parler pour autant à d'autres domaines d'excellence, la priorité qu'ils méritent?

Henri Korn est professeur à l'Institut Pasteur et directeur de recherche à l'INSERM. **Gérard Megie** est professeur à l'Université Pierre et Marie Curie. **Pierre Rouillard** est directeur de recherche au CNRS.

La science et l'Europe

FRANCIS BAILLY

Pour un service public européen de la recherche scientifique et de l'enseignement supérieur.



La recherche a considérablement évolué au cours des dernières décennies. Elle s'est d'abord fortement européanisée, les politiques de recherche s'opacifiant et les financements par contrats sans réel contrôle se substituant de plus en plus aux dotations publiques nationales. Cette transformation capitale s'évalue bien quand on compare le budget civil que la France consacre à la recherche et au développement (23 milliards de francs pour les crédits de paiement) et le budget recherche qui attribue la Commission européenne : 25 milliards de francs environ ! Simultanément les relations de la recherche avec les universités et avec les régions se sont intensifiées, on demande une valorisation des résultats de recherche dans l'industrie privée, et certaines avancées sociales (statuts des personnels, représentation dans les instances, etc.) sont menacées.

Comme cette nouvelle situation résulte de tendances de fond des sociétés européennes, une simple défense du *statu quo* français serait inopérante. Pour promouvoir des réformes à souci collectif et à visée progressiste, nous devons avoir des projets qui tiennent compte des réalités nouvelles.

Nous proposons de rendre dans attendre un service public européen de recherche et d'enseignement supérieur. Nous voulons ainsi préserver les conditions d'emploi des personnels, tout en assurant la transparence et la démocratisation de la gestion et des attributions de moyens. Un tel système protégerait les valeurs européennes en matière de production et de transmission des connaissances.

Pour justifier cette position, précisons, que, du fait des antagonismes actuels (marchés économiques, contrôle géopolitique, valeurs culturelles), le modèle européen de citoyenneté, avec la séparation nette entre la société civile et l'État, la méfiance à l'égard du communautarisme, la laïcité, nous paraît préférable au modèle américain. Nous préférons également notre culture européenne de ser-

vices publics, notre système de protection sociale et de régulation des marchés, le type de développement culturel qui est mis en œuvre de ce côté de l'Atlantique : statut de l'intellectualité, école publique, formation continue aidée. Ce modèle européen nous semble offrir plus de garanties aux individus, à l'exercice de la citoyenneté politique, aux régulations économiques, à la justice sociale, à l'épanouissement culturel.

L'écueil contre lequel il faut lutter, dans le cas précis de la recherche, est l'opacité de la politique de recherche, de l'attribution des contrats européens et, plus généralement, de la distribution des moyens communautaires. Ces choix sont aujourd'hui effectués de façon extrêmement technocratique, car ils sont conçus et vécus comme purement techniques par un nombre de responsables. Nous pensons qu'on doit restituer leurs dimensions de choix politiques à ces décisions, rendre transparentes toutes ces procédures, démocratiser les instances concernées et faire participer l'ensemble de la communauté scientifique européenne aux choix.

Plus précisément, nous pensons que le service public européen que nous préconisons sera possible si l'on constitue un Comité européen de la recherche scientifique. Ce comité ressemblerait au Comité national du CNRS, qui gère la carrière des chercheurs, élabore la prospective et définit les orientations de recherche. Réunissant des représentants de l'État, de l'administration, des représentants de la communauté scientifique, des représentants syndicaux, il remplacerait partiellement le Comité national actuel, assurant notamment la concertation, l'orientation et l'évaluation du service public européen de production et transmission de connaissances.

Une fois bien définie cette structure européenne de contrôle et d'orientation politiques, la question des découpages administratifs adéquats (organismes, universités...) et des lieux les plus adaptés pour la gestion effective (régions, état national, niveau européen) se résoudra

plus par la prise en compte de critères opérationnels (taille des États membres, traditions administratives et politiques) que par une détermination rigide, dans le respect de procédures qui garantiront la transparence et qui éviteront la constitution de féodalités locales, comme il est arrivé que la régionalisation en ait produit en France.

Un statut global de titulaires de ce service public s'imposera simultanément. Regroupant dans un corps unique les personnels de la recherche et de l'enseignement supérieur, il distinguerait cinq fonctions principales : (1) une fonction de recherche à temps plein ; (2) une fonction mixte d'enseignement et de recherche correspondant environ à un mi-temps dans chaque activité ; (3) une fonction d'enseignement à temps plein ; (4) une fonction d'accompagnement technique ; (5) une fonction de gestion administrative. Les agents devraient pouvoir évoluer dans ce cadre.

Les évaluations dans chaque fonction seraient effectuées par des instances nationales ou européennes, selon les spécialités et les tailles, et les carrières seraient gérées dans la transparence, en tenant compte de la fonction réellement occupée et du cadre où elle est exercée.

Un tel dispositif aurait de nombreux avantages : assurant la sécurité d'emploi des personnels, il tiendrait compte de leurs activités réelles et les évaluerait dans ce cadre (et non selon des critères définis pour des activités supposées) ; faciliterait la mobilité de fonctions et pourrait assurer des carrières convenables dans un service public reconnu par la société. Il permettrait aussi de surmonter nombre d'antagonismes actuels entre institutions (organismes et universités, par exemple). Il constituerait en même temps l'indispensable assise statutaire à une communauté scientifique européenne reconnue comme telle.

Francis BAILLY est physicien au Laboratoire CNRS de physique des solides, à Meudon.



Musée de la Poste - Paris

Internet avant la lettre

PAUL RIES

Les réseaux postaux se sont perfectionnés et étendus au XVII^e siècle, garantissant rapidité et fiabilité, ils ont jeté les bases des réseaux futurs, notamment celles du réseau informatique mondial.

Le développement d'une société est fortement dépendant de son système de communication. Le réseau mondial Internet prend chaque jour plus d'importance, et l'on s'interroge : l'Internet condamne-t-il les autres moyens de communication ? Certains ont disparu, le pneumatique cher à Marcel Proust, le télégraphe Chappe utile aux militaires du début du XIX^e siècle, plus récemment le télex, mais tous ont utilisé une structuration et des modes de distribution qui se sont lentement élaborés. La distribution de l'information est née avec le réseau postal, vieux de plusieurs millénaires.

Le réseau postal existait depuis des siècles en Chine, chez les Chinois, les Perses, les Indiens et les Arabes, réseaux qui furent en partie imités par les Grecs et par les Romains. Jusqu'au Moyen Âge, les systèmes de communication ont été créés et utilisés par les chefs séculiers et spirituels, à des fins politiques et administratives. Empereurs et dirigeants, papes et chefs religieux s'adressaient ainsi que leurs sujets sur ce qu'ils devaient faire ou ne pas faire, penser ou ne pas penser ; l'efficacité du système se mesurait à l'aune de sa capacité à servir ces impératifs.

Le peuple avait l'obligation légale – sans contrepartie – de fournir aux messagers de ses chefs nourriture, gîte, moyens de transport et tout ce qui pouvait être nécessaire à la bonne exécution de leur tâche. Mêlés à la population, les messagers étaient idéalement placés pour renseigner les puissants sur l'efficacité de leurs mesures et sur les opinions du peuple.

Cette double fonction de courrier et d'espion était déjà l'usage chez les messagers romains ; les informations recueillies étaient transmises par une catégorie d'agents des postes, nommés *curiosi*. Ces messagers particuliers avaient aussi des ombres.

Ainsi, au XVII^e siècle, les garçons de poste anglais, qui servaient le système instauré par le Parlement britannique contre le Parlement et qui fut repris par le Parlement de Cromwell en 1657, ont l'instruction de transmettre les ordres des dirigeants à leurs sujets, mais aussi de découvrir les menaces contre la paix du royaume et de s'y opposer. Dans l'Europe du XVII^e siècle, tous les dirigeants créent des agences secrètes constituées de maîtres de poste espions. Il ne fait pas de doute que des *curiosi* de l'Internet surveilleront (ou surveillent déjà) le réseau.

LE RÉSEAU POSTAL

Si l'outil de contrôle est efficace, qu'en est-il du service rendu aux individus ? L'ancienneté et la fréquence des interdictions visant toute forme de communication suggèrent que ce besoin de liberté des personnes ou des groupes est fort ancien. Dans la Rome antique, les personnes fortunées échangent des messages par l'intermédiaire de leurs serviteurs : ils écrivent leur message sur des ardoises, de sorte que les porteurs, qui ne savent pas lire, ne peuvent en connaître le contenu, et cette pratique, que ce soit entre personnes, entre corporations, entre monastères ou entre villes, continuera jusqu'à la fin du

Moyen Âge. D'abord d'ardoise, le support de ces messages devient le parchemin ou le vélin, puis le papier.

Ne pouvant interdire ces communications privées, les autorités en contrôlent le contenu ; elles accordent à certaines ordonnances le droit officiel de la permission de laisser les messagers privés et de lire leurs messages. Aussi les messagers privés, qu'aucune législation n'a réussi à éliminer, bénéficient-ils enfin d'une reconnaissance de fait. De surcroît, comme les instances gouvernementales ne souhaitent aucune ingérence privée dans leur système postal, les messagers privés finissent par bénéficier de la même protection contre les attaques que les courriers officiels. Avec la création d'un responsable général des postes en charge de toute l'activité messagère, les deux systèmes – celui de l'État et le privé – fusionnent.

Une des principales conséquences de cette fusion est la multiplication des voies, principales ou secondaires, qui relient les routes postales établies. Certaines de ces voies contribuent à la cohésion interne des États, d'autres, qui avaient été développées au fil des siècles par les communautés de marchands de tous les pays, s'étendent au-delà des frontières.

Cette extension du réseau international a des conséquences politiques, diplomatiques et économiques. Quand Christophe Colomb découvre le Nouveau Monde, ce réseau international est déjà en place dans l'Ancien Monde et, dès la fin du XVII^e siècle, il est utilisé par tous les acteurs de la vie sociale, ambassadeurs, artistes, évêques, courtisans, artisans, diplomates, maquignons, négociants, pèlerins, postiers, princes, érudits et soldats, et même des femmes et des enfants des classes aisées. Les courriers sillonnent le continent européen ou empruntent les routes maritimes des eaux européennes et, parfois, se hasardent en haute mer vers d'autres continents.

Pouvons-nous évaluer aujourd'hui l'efficacité de ces réseaux ? Les systèmes de mesure ne sont pas uniformisés de sorte que les distances sont évaluées en unités différentes d'un pays à l'autre, souvent même d'une région à l'autre ; aussi la comparaison des performances est-elle difficile ; de plus, les véhicules sont tous attaqués régulièrement par des « bandits de grand chemin ». Même quand les conditions sont bonnes et la sécurité assurée, l'efficacité dépend de l'urgence des messages, de la distance à parcourir, du moyen de transport et de la compétence du coursier. À pied, un messager

LE RÉSEAU POSTAL européen au XVII^e siècle : il dessert toutes les grandes villes. Transport terrestre et transport maritime se complètent pour assurer rapidité et fiabilité. Pendant des nouvelles maisons postales régulières, les journaux publics à date fixe apparaissent. Dans certains pays, telles la France, l'Angleterre ou l'Espagne, le gouvernement limite à un ou deux le nombre des journaux, potentiellement subversifs. Dans d'autres pays, telle l'Allemagne, les publications abondent. On a indiqué en rouge les villes ayant un relais postal ; en vert, les journaux fondés entre 1609 et 1629 ; en violet, les journaux fondés entre 1630 et 1648 ; en orange, ceux qui ont vu le jour entre 1649 et 1700.

parcourt, en moyenne, six kilomètres par heure sur de courtes distances ; sur de plus longs trajets, des émissaires qui se relaient couvrent jusqu'à 150 kilomètres par jour, en marchant jour et nuit. En changeant régulièrement de monture, un cavalier expérimenté atteint une vitesse moyenne de 12 kilomètres par heure et, en relais, les messagers couvrent plus de 300 kilomètres en 24 heures. Qui ne se souvient de la célérité avec laquelle, en dépit des embûches, les trois mousquetaires ont transporté les ferrets de la Reine.

Les charges les plus lourdes sont acheminées par des chevaux de trait, qui tirent jusqu'à une tonne ; la vitesse, qui dépend notablement de l'état des routes, dépasse alors rarement 50 kilomètres par jour. Quand les messages sont trop lourds ou rouler trop vite, les chevaux sont mis en péril. Ainsi, en 1674, des poissons frais sont transportés vivants depuis la Manche, dans des cuves pleines d'eau, sur des charrettes fabriquées pour l'occasion ; les poissons doivent être le premier plat d'un dîner donné en l'honneur de Louis XIV par Condé, dans son nouveau château de Chantilly. Le poisson n'étant pas arrivé à l'heure prévue, le chef cuisinier, Vatel, se suicide.

RAPIDITÉ ET RÉGULARITÉ

Certains messagers, sans égard pour leurs montures ni pour eux-mêmes, établissent des records historiques. Ainsi, en 1600, sir Robert Car, apporte à Édimbourg la nouvelle de la mort de la reine Elisabeth : il parcourt 1 000 kilomètres en moins de trois jours. Ou encore, ce cheval qui, en 1689, parcourt les 30 kilomètres qui séparent les châteaux royaux de Copenhague et de Frederiksborg en 42 minutes : il succombe à l'arrivée. Conservé, empaillé et renvoyé aux étables royales de Copenhague, il y est encore exposé aujourd'hui.

Aucun exploit de ce type n'est garanti par le «Comte de la Tour & Tassis, Général Héritaire de la poste pour sa Majesté

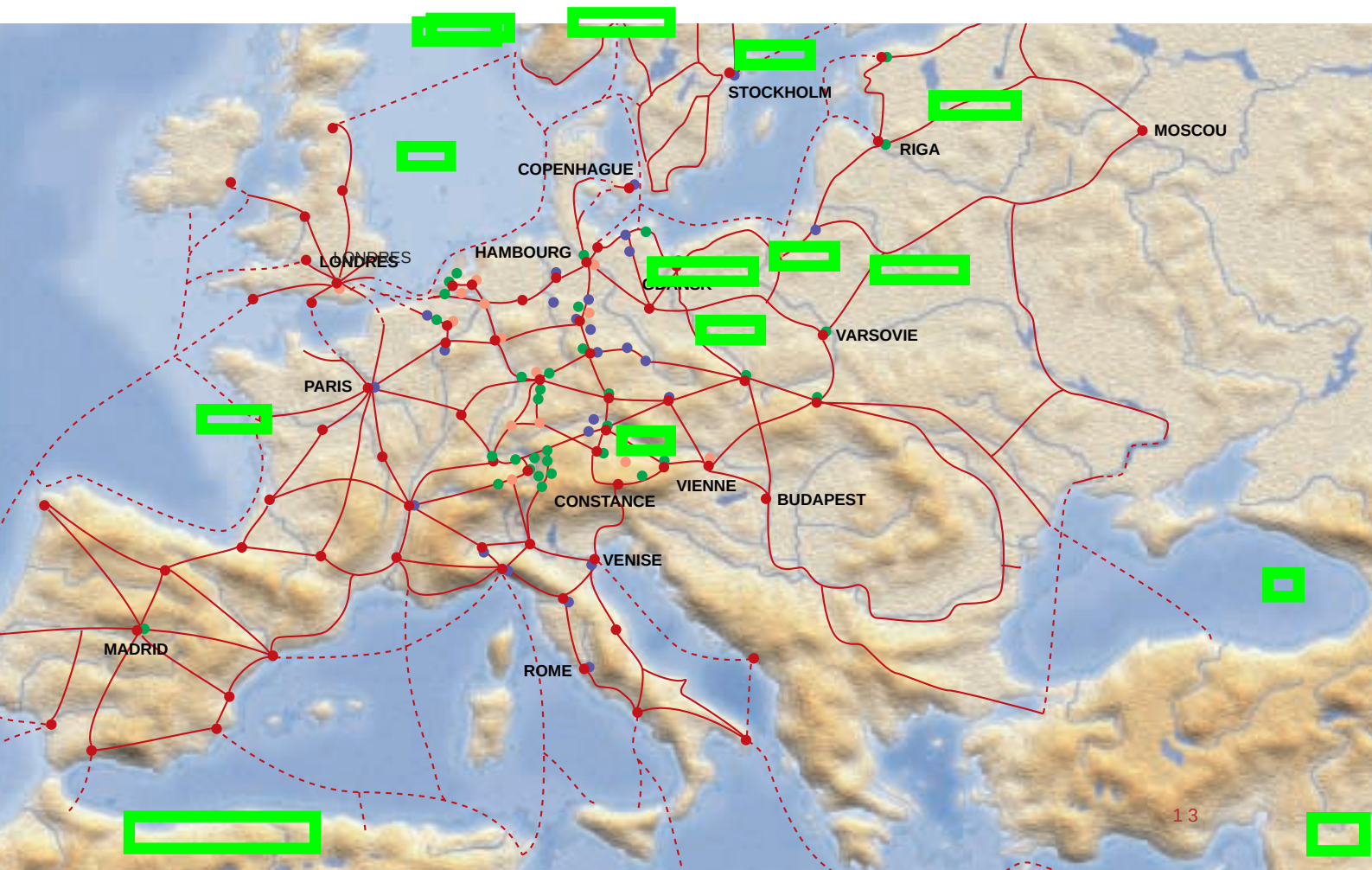
Impériale & pour l'Empire sur tout son territoire, et de Sa Majesté Catholique le Roi d'Espagne dans ses Pays, en Bourgogne, &c.», qui tente, en 1660, de s'imposer sur le marché des transports internationaux en réduisant de quatre à cinq jours le temps d'acheminement des lettres entre Londres et Venise, Milan, Gênes et Rome. La compagnie s'engage à fournir des malles qui effectueront la traversée entre Anvers et Bruxelles en moins de 48 heures, été comme hiver, sauf en cas de mauvais temps. Cette clause restrictive est indispensable car les conditions météorologiques sur la Manche sont imprévisibles, et les traversées durent de cinq heures à cinq jours.

Quand le courrier a atteint la terre ferme, les lettres sont acheminées par des garçons de poste à cheval qui travaillent en relais sur un vaste réseau bien organisé. S'ils ne peuvent rivaliser en vitesse, ces postiers garantissent régularité et fiabilité. On commence à établir des jours de poste fixes et à coordonner les bureaux de poste ; les transports se transforment progressivement en une industrie qui prospère et rend accessibles à un nombre croissant de personnes des services réguliers. Si les moyens de transport ultérieurs augmenteront la vitesse des transmissions et leur portée, les fondements de la transmission postale sont déjà établis.

Le service postal favorise un nouveau phénomène social : la diffusion des journaux. Parce que leur fiabilité dépend de la régularité avec laquelle ils transmettent les nouvelles, les journaux sont un bon indicateur de l'efficacité du système postal.

Avant l'essor des journaux dans l'Europe du XVII^e siècle, les nouvelles étaient publiées sur des feuilles volantes, imprimées à l'occasion d'un mariage princier, du siège d'une ville ou d'une catastrophe naturelle. On ne trouvait pas un service régulier, et ces feuillets se limitaient (d'ailleurs) aux nouvelles sensationnelles.

Grâce à l'amélioration des services postaux, des nouvelles internationales commencent à circuler régulièrement sur le réseau postal, ce qui permet aux imprimeurs de publier des journaux une ou deux fois par semaine. On ignore quel fut le





Musée de la Poste - Paris

premier imprimeur à publier régulièrement des journaux en Europe. On sait cependant que, dès 1600, dans plusieurs villes jalonnant le réseau postal, des imprimeurs publient les nouvelles qui leur parviennent. En 1605, Strasbourg, est un carrefour commercial international, et les petites villes de Francfort et de Wolfenbuttel publient leurs propres journaux, et bientôt des hebdomadaires apparaissent à Francfort et à Anvers (1615), à Berlin (1617), à Hambourg (1618), à Stuttgart et à Dantzig (1619), à Cologne, à Amsterdam et à Londres (1621), à Paris (1631), etc. Même si nombre d'entre eux n'ont qu'une existence éphémère, l'Europe compte, en 1669, environ cinquante hebdomadaires publiés en plus de dix langues.

LES JOURNAUX

Le nombre de titres dans chaque ville, ou dans chaque pays, est fixé par les gouvernements et par celui du marché national et l'Angleterre n'ont qu'une parution chacune après 1660, tandis que les pays scandinaves en comptent 5 et les Pays-Bas 25, et l'Allemagne plus de 200. Malgré les ravages de la guerre de Trente Ans, qui menacent la poste et la presse, bon nombre des journaux fondés en temps de paix passent le cap de l'an 1700. Sans survivent c'est que leurs comptes rendus des faits et des événements sont rigoureux et complets, et qu'ils intéressent les hommes politiques, les négociants, tous ceux pour qui l'information est vitale.

Les informations parviennent aux éditeurs par l'intermédiaire des agences postales. Nous avons étudié quatre journaux de l'époque, dont trois publiés à Hambourg : le

bihebdomadaire *Europäische Mitwochentliche Zeitung* édité par le bureau local du Maître des postes impérial, le trihebdomadaire *Ordinari Dienstags Zeitung*, et le bihebdomadaire *Nordischer Mercurius*, édité par un notaire et distribué le mardi et le vendredi «à 12 heures précises». Le quatrième journal, *Ordinarie Post-Zeitung*, est publié à Copenhague, en allemand, en général le mardi et le samedi par un imprimeur qui publie également deux journaux en danois.

En 1669, ces quatre journaux publient respectivement 714, 1 647 et 713 articles, et 582 pour le dernier, dont il ne reste que 77 numéros sur 20 publiés. En tête de chaque article figurent le lieu d'origine de la nouvelle et la date à laquelle l'article d'origine a été rédigé : les informations qui représentent le contenu de ces journaux proviennent de 289 villes (Venise, Rome, Paris, Vienne, Madrid...). Le nombre de jours qui s'écoulent entre la date de rédaction de l'article d'origine et sa date de publication dans un de ces journaux varie de 8 à 30 jours. Ces délais qui incluent le transport des textes, leur sélection, la composition et l'impression, reflètent par leur variété, les conditions aléatoires de travail des éditeurs.

Le bihebdomadaire traite un très grand nombre de dépêches (plus de 600) pour un nombre total de centres d'information modestes (17). Il couvre toute la politique européenne à partir d'une « ligne d'approvisionnement » principale passant par Venise et par Rome, et d'autres connexions avec Paris, Vienne, Madrid ou Constantinople. Le trihebdomadaire reçoit des rapports de 169 provinces différentes, surtout des petites communautés de commerçants, entre Hambourg et les frontières de l'empire. L'information y est surtout de nature locale, avec des nouvelles des villes et des ports de commerce de part et d'autre de la Manche ; en revanche, il y a très peu de nouvelles des villes du Sud. Comme son confrère, le « journal de midi » il convoie peu de nouvelles du Sud, mais donne les nouvelles locales, celles des marchés anglais et polonais, et des bulletins météorologiques bihebdomadaires pour la Manche et la mer du Nord, ce qui attire l'intérêt de la communauté marchande de Hambourg.

Naturellement, la portée, la vitesse et la qualité des nouvelles diffusées par un journal dépendent de ses sources avant que de l'éditeur et de l'imprimeur, et les différences sont notables. Avec 60 000 à 70 000 habitants, Hambourg est alors de la même taille que Berlin ou Bruxelles, bien plus petite que Londres ou Paris. En 1669, le nombre de lecteurs, dont beaucoup de marchands venus de toute l'Europe pour y négocier, est suffisamment important pour faire vivre trois journaux différents en langue allemande et pour inciter l'un des éditeurs à publier des journaux en latin et en français, et même un journal «européen», qui comprend des articles en italien, en français et en anglais.

Le journal *Ordinarie Post-Zeitung* de Copenhague, est une réédition d'articles déjà publiés dans les journaux de Hambourg : les 302 articles publiés le mardi et le samedi ne sont qu'une sélection des 3 074 publiés précédemment dans les journaux de Hambourg, et qui arrivent à Copenhague par la poste. Toutefois, ce journal n'en est pas moins intéressant pour diverses raisons. Tout d'abord, comme les articles sélectionnés par chaque numéro du journal de Copenhague sont régulièrement puisés dans les derniers numéros des journaux de Hambourg, avec un décalage de cinq jours, la périodicité de la publication prouve la régularité avec laquelle les garçons de poste effectuent la liaison Hambourg-Copenhague.

Deuxièmement, les garçons de poste ont 60 heures pour parcourir ces 400 kilomètres, y compris deux traversées par bateau, ce qui prouve que les équipes de relais réussissent à maintenir sur terre, par toute saison, une vitesse moyenne régulière de sept kilomètres et demi. Troisièmement, puisque l'éditeur utilise régulièrement les journaux de Hambourg, qui arrivent à midi le vendredi et le lundi pour ses propres éditions du samedi



Comment le sel modifie le goût

HERVÉ THIS

La saveur salée transforme et atténue les saveurs amères et sucrées

Le vrai gourmand a deux grandes craintes : la goutte et le régime sans sel. Contre la goutte, il s'abstient (parfois) des viandes faisandées, mais il est désarmé contre le régime sans sel, et redoute le médecin qui l'administre. Cette crainte est doublement fondée : Gary Beauchamp et ses collègues du Centre Monell d'étude des sens chimiques, à Philadelphie, ont montré que l'absence de la saveur salée n'est pas le seul désagrément du régime ; absent, le sel laisse s'exprimer les saveurs déplaisantes, et nous met pas les goûts plats sur le devant de la scène gustative.

Dans le numéro d'avril 1999, nous avons examiné l'action du sel sur la texture des aliments, mais nous avons négligé son goût. Le chlorure de sodium est une molécule sapide, qui stimule les récepteurs des papilles, et il d'autres vertus gustatives ? Est-il cet « exhausteur de goût » que certains évoquent ?

Cette question a été expérimentalement examinée au Centre Monell. G. Beauchamp ne s'est pas limité au seul chlorure de sodium, mais il a également testé divers sels, tel que le chlorure de lithium, le chlorure de potassium, l'aspartate de sodium...

Les études visaient à explorer l'effet paradoxal du sel : la plupart des études de psychophysiologie, qui testent les saveurs par paires, montrent que le sel supprime la saveur qu'il accompagne ou n'a eu aucun effet sur celles-ci, mais tout gourmand sait que les aliments sans sel perdent beaucoup de leur intérêt. Par exemple, si les cuisiniers ajoutent du sel à leur pâte à tarte (même pour une tarte sucrée), c'est moins pour saler la pâte que pour lui donner du « goût ».

Les psychophysiologistes de Philadelphie ont voulu savoir si le sel filtre sélectivement les saveurs, comme l'intuition culinaire l'indique, affaiblissant les saveurs déplaisantes (tels l'amer) et rehaussant les saveurs agréables (tel le sucré). Ils ont jugé que les comparaisons papillaires étaient insuffisantes, et ils ont comparé des solutions aqueuses contenant une ou plusieurs substances parmi les trois suivantes : l'urée (amère), le saccharose (le sucre de table) et l'acétate de sodium. Ce choix a ses raisons : le saccharose, ajouté à l'urée, en supprime l'amertume ; et l'acétate de sodium apporte des ions sodium sans donner une saveur trop salée. Une dizaine de sujets devaient

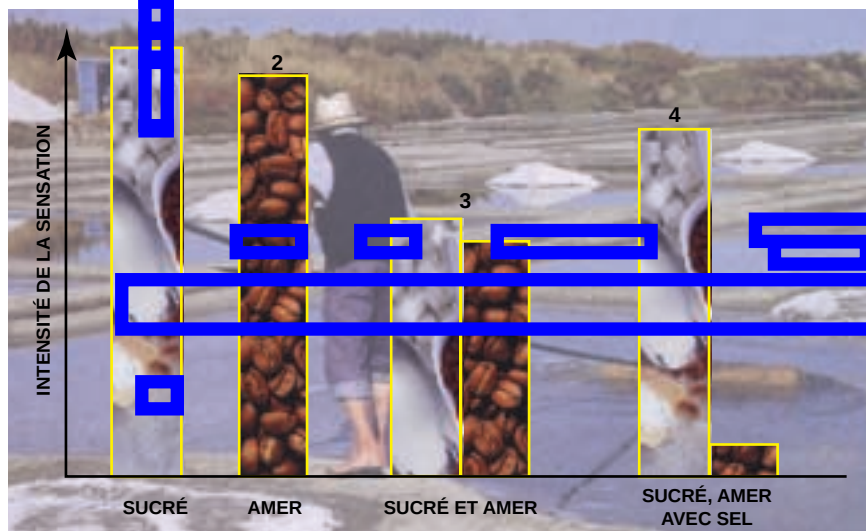
évaluer l'intensité de la saveur amère, de la saveur sucrée et des autres sensations sapides, pour toutes les combinaisons de trois concentrations en urée, de quatre concentrations en sucre et de trois concentrations en sel.

Comme prévu, l'acétate de sodium réduisait l'amertume, mais, ce que l'empirisme gastronomique ne prévoyait pas, l'amertume de l'urée était bien plus éteinte par le sel que par le sucre : les mélanges de sucre, d'urée et de sel étaient moins amers et plus sucrés que les mélanges d'urée et de sucre non salés. En outre, aux fortes concentrations en sucre, le caractère sucré était augmenté par l'ajout d'acétate de sodium. Ce phénomène survient probablement parce que le sel élimine l'affaiblissement de l'intensité sucrée par l'amertume due à l'urée. Conformément à l'hypothèse, l'ajout d'acétate de sodium au sucre, en l'absence d'urée n'augmentait jamais l'intensité sucrée.

Ces travaux, complétés pour bien d'autres composés, ont démontré que l'ion sodium est responsable de l'effet : c'est lui qui supprime sélectivement l'amertume et, probablement, d'autres saveurs désagréables, tout en augmentant les saveurs agréables. L'ion sodium n'est donc pas un exhausteur de goût, mais un modificateur de saveurs. L'ajout de sel à des aliments aussi variés que les légumes (souvent amers, comme l'endive), certains aliments gras ou les viandes s'est peut-être imposé parce que l'on voulait inconsciemment supprimer des goûts déplaisants. Les expériences semblent également expliquer pourquoi certains amateurs de café mettent une pincée de sel dans le filtre : ils éteignent ainsi l'amertume de la caféine.

On ignore aujourd'hui comment la stimulation des récepteurs gustatifs explique ces effets, mais on comprend enfin pourquoi les légumes sans sel font faire la grimace.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 29 juillet 1999, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



Une solution sucrée et amère (3) semble moins amère et plus sucrée quand on lui ajoute du sel (4). Les concentrations en urée, en sucre et en sel étaient identiques pour les quatre tests.

Cécité et vieillissement

Les radicaux libres semblent participer à la dégénérescence de la rétine liée à l'âge, une maladie qui touche de nombreuses personnes âgées.

L'espérance de vie augmente régulièrement, mais, avec elle, les pathologies liées au vieillissement et, notamment, la cécité : sept pour cent des personnes de plus de 75 ans ont une vision dégradée. Si l'on sait assez bien corriger la cataracte (l'opacification du cristallin) et le glaucome (une tension trop élevée dans le globe oculaire), on ignore comment combattre la dégénérescence maculaire liée à l'âge, encore nommée DMLA. La macula est la zone centrale de la rétine essentielle à la vision. Toutefois, l'étude menée par Cécile Delcourt, dans l'équipe de Laure Papoz, de l'unité INSERM 503, à Montpellier, semble conforter l'hypothèse d'une dégradation de la rétine par les radicaux libres, des molécules très oxydantes, qui endommagent le matériel cellulaire, notamment les membranes et l'ADN ; les cellules soumises à de telles oxydations meurent, et le vieillissement est accéléré. Cette hypothèse ouvrira-t-elle une nouvelle piste thérapeutique ?

Au centre de la rétine, dans la région de la macula, la densité des photorécepteurs est maximale, tout comme l'acuité visuelle. C'est également dans cette zone que les pigments jaunes sont les plus denses. Cette pigmentation a donné son nom à la région – macula lutea, ou tache jaune. Quand la macula dégénère, la vision des détails est

détériorée et les personnes atteintes ne peuvent plus lire ni conduire, et ne reconnaissent plus les visages des personnes qu'elles rencontrent, même lorsque ce sont des proches. La vision périphérique, qui permet de se repérer dans son environnement, reste correcte, mais, au centre de l'image, une tache noire masque les images. Pour dépister et, éventuellement, prévenir cette maladie, on doit d'abord en élucider les mécanismes et trouver des facteurs de prédisposition.

Sur la rétine de la quasi-totalité des personnes âgées (80 pour cent), on observe de petites taches jaunâtres, nommées drusen : ce sont des débris de cellules de l'épithélium pigmentaire (une des couches constituant la rétine) qui s'accumulent et ne sont plus éliminés par les «éboueurs» de l'organisme. Lorsqu'ils sont de petite taille, les drusen ne troublent pas la vision. Quand la pathologie évolue, les photorécepteurs (les cônes et les bâtonnets) dégénèrent aussi, car leur intégrité dépend de celle des cellules de l'épithélium pigmentaire. Lorsque les débris accumulés sont trop abondants, le contact entre l'épithélium pigmentaire et la couche juxtaposée (la choroïde) se dégrade : l'épithélium pigmentaire n'est plus alimenté et commence à dégénérer. Pour pallier cette carence, de petits vaisseaux prolifèrent, irriguant la zone en péril. Toutefois, la prolifération est excessive, et du sérum s'écoule de ces vaisseaux : un film liquide accélère le décollement de l'épithélium pigmentaire. Les drusen grossissent, la vascularisation s'accélère et les taches s'étendent : simultanément l'acuité visuelle décroît.

Deux pour cent des personnes qui ont des drusen finissent par avoir une

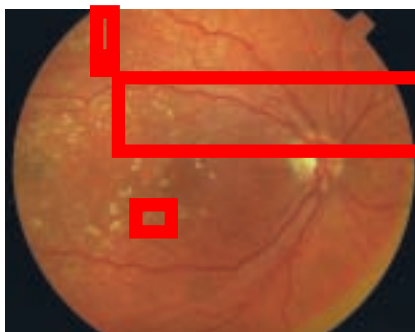
dégénérescence maculaire. Pourrait-on, d'après l'aspect ou le nombre des drusen, prévoir la survenue de la maladie et sa gravité ? On commence à identifier quelques facteurs de risques. Ainsi, d'après diverses études épidémiologiques, les personnes qui fument et celles qui ont des plaques d'athérome (un rétrécissement des artères souvent à l'origine d'accidents vasculaires cérébraux) sont plus souvent exposées. Le risque est multiplié par cinq chez les gros fumeurs.

Or on sait que la fumée de cigarette libère des radicaux libres et que le stress oxydant est déjà incriminé dans diverses pathologies, telles les maladies cardiovasculaires et la maladie d'Alzheimer. La rétine contenant beaucoup d'acides gras polyinsaturés, très sensibles aux radicaux libres, peut-on lier le stress oxydant et la dégénérescence de la macula ?

L'étude POLA, coordonnée par C. Delcourt à Sète, vise à étudier l'impact des maladies cardiovasculaires liées à l'âge. Plus de 2 500 personnes dont la moyenne d'âge est égale à 70,4 ans participent à cette étude épidémiologique : elles ont subi un examen oculaire approfondi et des tests biologiques, notamment un dosage de la glutathion peroxydase, une enzyme présente dans le sang et qui intervient dans les mécanismes de lutte contre les radicaux libres.

L'étude a révélé que les personnes ayant une concentration plasmatique élevée de glutathion peroxydase ont neuf fois plus de risques que les autres d'avoir une dégénérescence maculaire tardive. L'équipe de Montpellier suppose que la concentration en glutathion peroxydase augmente pour lutter contre les radicaux libres en excès dans l'organisme. Pourtant, malgré une forte production de l'enzyme qui piège les radicaux libres, le système antiradicalaire deviendrait inefficace et le stress oxydant poursuivrait son action destructrice. Une augmentation de la concentration en glutathion peroxydase pourrait-elle servir de facteur prédictif ? Pour le savoir, les personnes qui participent à l'étude vont être suivies pendant trois ans.

Aujourd'hui, on ne dispose d'aucun médicament, et les traitements par laser n'améliorent généralement pas l'acuité visuelle. L'utilisation d'antioxydants, par exemple de vitamines, préviendrait-elle l'apparition des dégénérescences maculaires liées à l'âge et en réduirait-elle la gravité ?



C. Delcourt

Les drusen (les petites taches jaunes, à gauche) témoignent de l'accumulation de débris cellulaires. Quand les taches grossissent (à droite), elles indiquent que la personne a une dégénérescence maculaire liée à l'âge.

L'échantillon de stalagmite (*à gauche*), de six centimètres de hauteur, provient des Grottes de Choranche. L'alternance de lamines claires et sombres, ainsi que les particules organiques qu'elles contiennent, retracent près de 400 ans d'activités humaines à la surface. Ainsi, sont enregistrées les faibles activités rurales actuelles (*a*) avec peu d'inclusions, la production de charbon de bois des forges à canon de Saint-Gervais entre 1750 et 1900 (*b*), et le défrichement des Chartreux de la Bourne pendant le *xvii^e* siècle (*c*).

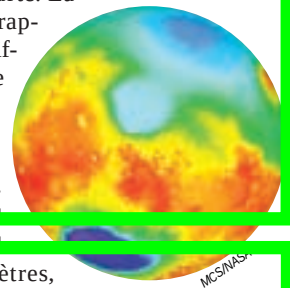
L'eau des précipitations s'infiltre dans un sol calcaire après s'être enrichie en dioxyde de carbone au contact des débris organiques de l'humus. Par percolation, l'eau ainsi acidifiée progresse et dissout le calcaire jusqu'à saturation. Lorsque cette eau débouche dans une cavité, une grotte par exemple, la concentration en dioxyde de carbone dans l'air est inférieure à celle de dioxyde de carbone dissous. L'équilibre tend à s'établir, le dioxyde de carbone repasse à l'état gazeux et les ions carbonates dissous, en excès par rapport au dioxyde de carbone, cristallisent en calcite. Peu à peu, les dépôts de ces cristaux forment une stalactite. La goutte tombe, perd encore du dioxyde de carbone, une stalagmite s'élève à l'enlomb de la stalactite en quelques semaines.

Les dépôts successifs de calcite plus ou moins poreuse, nommés lamines, enregistrent l'intensité des précipitations. Les géophysiciens ont analysé la structure cristalline de l'échantillon en mesurant l'intensité de diffusion, c'est-à-dire la quantité de lumière réfléchie dans toutes les directions, en éclairant sa surface avec un faisceau laser.

Pendant les mois pluvieux (d'octobre à avril), l'eau est abondante et la fraîcheur empêche l'évaporation : la percolation est alors rapide, les carbonates cristallisent rapidement en une couche de calcite poreuse constituée de petits cristaux qui croissent dans toutes les directions. La lumière diffusée est importante, et la calcite apparaît blanche et laiteuse lorsqu'elle est éclairée. En revanche, pendant le

Dans les films de gangsters, le bon ou le méchant est enfermé dans un coffre de voiture. Grâce à un mécanisme de détection, le coffre se maintient s'échapper : un dispositif mis au point par les ingénieurs de la *General Motors* utilise un capteur infrarouge qui détecte les mammifères par la chaleur qu'ils dégagent. Ce mécanisme servira à éviter les accidents : au cours de l'été 1998, 11 enfants sont morts des suites d'enfermement dans un coffre de voiture.

La sonde *Mars Global Surveyor* a fourni la première image tridimensionnelle globale de la surface martienne. Après avoir rassemblé près de 27 millions de mesures d'élévation durant deux années, les astronomes ont établi la carte. La caractéristique la plus frappante de Mars est la différence entre le lisse hémisphère Nord et l'hémisphère Sud, couvert d'impacts de météorites. L'écart d'altitude entre les deux est dominant et le point le plus bas est de 8,6 kilomètres, une fois et demie la valeur sur Terre. Enfin, la planète a une forme de poire : l'hémisphère Nord est à une altitude globalement inférieure à celle de l'hémisphère Sud. Au début de l'histoire martienne, l'eau avait un mouvement du Sud vers le Nord.



Les ordinateurs gagnent au backgammon, aux échecs... et ils font aujourd'hui les mots croisés : Michael Littman, de l'Université Duke, a apporté son programme *Proverb* au Tournoi de mots croisés de Stamford. Si la machine avait été classée, elle aurait été 147^e sur 254. *Proverb* est exécuté en parallèle par plusieurs ordinateurs personnels ; il résout les mots croisés très différemment de nous. (C'est d'ailleurs ce qui a permis

finition telle que «cracheur sicilien» (pour évoquer l'Etna), il envoie toutes les indications qu'il analyse, ainsi que la longueur du mot cherché, à ses 30 modules. Chacun de ceux-ci renvoie une liste de possibilités, assorties de probabilités, issues des bases de données compilées à partir de 14 années de mots croisés publiés dans les journaux.

La nébuleuse Papillon

En recherchant des étoiles jeunes massives dans le Grand nuage de Magellan, l'une des galaxies les plus proches de la nôtre, une équipe de l'Observatoire de Paris a découvert une nébuleuse aux formes étranges. Nommée

nébuleuse Papillon, cet objet est à 170 000 années-lumière. Des étoiles massives, très chaudes, éjectent des arcs et des filaments

printemps et l'été, peu d'eau s'infiltre, les cristaux de calcite sont compacts et bien ordonnés. La lumière les traverse facilement, ils réfléchissent peu de lumière et ont un aspect sombre. Ainsi, comme les cerneaux concentriques d'un arbre renseignent sur son âge, l'alternance de lamines blanches et sombres permet aux géophysiciens de remonter dans le temps, à raison d'un couple de lamines par année.

L'analyse des proportions relatives des lamines sombres et claires a mis en évidence des cycles de précipitation sur le Vercors de 2,5, 6 et 8,7 années. De telles oscillations n'avaient jamais été observées dans les Alpes françaises. À

et des molécules organiques dont l'analyse fournit de précieuses indications sur la végétation et sur les activités humaines. Ainsi, les particules de charbon de bois et d'argile observées au microscope dans les lamines attestent de l'essartage — une technique de défrichage par brûlis — pratiqué par les moines Chartreux de la Bourne aux ^{xvii}^e et ^{xviii}^e siècles, et de l'activité de la forge à l'arsenal de Saint-Gervais, au pied du plateau du Vercors entre environ 1750 et 1800. Pendant deux siècles, les incisions de charbon de bois sont si nombreuses que les lamines sont grises (voir la figure).

Papillon, la taille des molécules organiques entraînées par l'eau de percolation nous indiquera le degré de dégradation des débris végétaux et la qualité du sol. Les stalactites et les stalagmites racontent l'histoire de la surface.

lumière de diamètre. Au centre (détail, en haut à droite), on distingue la nébuleuse en forme de papillon. C'est la première fois que l'on observe une pareille forme, qui résulterait de l'éjection de gaz par une étoile très massive, enfouie dans la zone d'absorption centrale.

Engrenage brûlant

La forêt amazonienne est menacée par les incendies allumés la plupart du temps par l'homme, volontairement ou non. La menace est insidieuse : un premier incendie ne consume souvent que les feuilles mortes et les plantes situées au ras du sol, mais il entraîne la mort de nombreux autres arbres, qui deviennent autant de combustible facilement inflammable dans un second incendie. Selon une étude publiée dans *Science*, qui a étudié les incendies dans la forêt près du delta de l'Amazone, l'intensité et la vitesse de diffusion des incendies successifs au même endroit augmentent, jusqu'à la disparition complète des arbres. Les zones récemment brûlées, mais pas complètement détruites, devraient donc être particulièrement surveillées.

0,0449 litre pour 100 kilomètres...

...soit 2 227 kilomètres avec un litre d'essence, performance établie par l'équipe du lycée La Colivierie de Nantes, avec leur véhicule Micro Joule lors du *Shell Eco-Marathon* 1999, sur le circuit du Castellet. Chaque année, des équipes de professionnels ou

la consommation de leurs prototypes sur une distance d'environ 20 kilomètres,

avec comme seule contrainte pour le pilote de rouler à plus de 25 kilomètres par heure. La barre des 2 000 kilomètres par litre d'essence a été franchie cette année.

Mosaïque paléolithique

Néandertal et Cro-Magnon se seraient mélangés.

Lorsque les hommes modernes arrivent en Europe, il y a 40 000 ans, ils se côtoient et se croisent avec un autre type d'hommes, les Néandertaliens. Une dizaine de milliers d'années plus tard, ces derniers ont disparu. Que sont-ils devenus ? Les deux populations se sont-elles rencontrées ? Se sont-elles affrontées ? Selon une équipe dirigée par Erik Trinkaus, de l'Université Washington de Saint-Louis, et Joao Zilhao, de l'Institut portugais d'archéologie, non seulement

les deux populations ont coexisté, mais elles se sont mélangées, au moins localement. La preuve ? Le squelette d'un enfant mort il y a 24 500 ans, trouvé en décembre dernier au Portugal, présente à la fois des caractères néandertaliens et des caractères modernes.

Il y a un million d'années, des *Homo erectus*, dont l'espèce s'est éteinte en Afrique, arrivent en Europe, en passant par le Proche-Orient. Soumis à une alternance de brèves périodes chaudes et de longues glaciations qui isolent l'Europe de l'Asie, ces hommes évoluent et deviennent, il y a un peu plus de 100 000 ans, des Néandertaliens. Bien adaptés pour résister au froid, ils sont trapus, robustes et vigoureux : leurs



À la base de cette falaise (à droite), située à une centaine de kilomètres au Nord de Lisbonne, un enfant (à gauche) a été inhumé, enroulé dans des peaux couvertes d'ocre, il y a 24 500 ans, par une population qui descendrait à la fois des Néandertaliens et des hommes modernes.

proportions corporelles «hyperarctiques» les rapprochent des Esquimaux actuels. En plus d'un front et d'un menton fuyants, avec un bourrelet au-dessus des orbites, hérités de *Homo erectus*, leur crâne a des caractères spécifiques : un nez proéminent, de larges orbites, des pommettes fuyantes et un crâne allongé.

Les hommes modernes de cette époque, dont le type le plus connu est l'homme de Cro-Magnon, sont comparativement plus graciles : les premiers qui arrivent en Europe (probablement d'Afrique) ont même des proportions corporelles subtropicales (ils ressemblent aux Hotteots). Cette caractéristique exceptée, ils nous ressemblent en tous points.

À partir d'il y a 40 000 ans, ils envahissent progressivement tout le territoire occupé auparavant par les Néandertaliens, dont les derniers représentants connus s'éteignent il y a 30 000 à 28 000 ans, au Portugal et dans le Sud de l'Espagne. C'est donc d'un homme moderne que les archéologues pensaient avoir trouvé la sépulture à Lagar Velho, à une centaine de kilomètres au nord de Lisbonne : une lentille de charbons de bois sous les jambes du squelette et deux os de cerf associés à celui-ci ont été datés de 24 500 ans, et de l'ocre, saupoudré probablement sur des peaux qui enveloppaient le corps, couvre les os, comme dans d'autres sépultures de cette période en Europe. Le squelette est celui d'un enfant d'environ quatre ans, selon son

développement dentaire. Son crâne a malheureusement été détruit par l'engin de terrassement qui a révélé le site. Sa mâchoire, bien conservée, porte un menton très proéminent, qui, avec les tailles relatives de ses incisives et de ses molaires, est caractéristique de l'homme moderne.

En outre, les proportions relatives de ses membres ainsi que la robustesse de ses os lui donnent une corpulence plutôt néandertalienne. La forme de la symphyse mentonnaire (la suture entre les deux côtés de la mandibule) ressemble aussi à celle des Néandertaliens, tout comme les marques d'accrochage des muscles sur le bras. D'autres dimensions corporelles sont intermédiaires entre celles des Néandertaliens et celles des hommes modernes anciens.

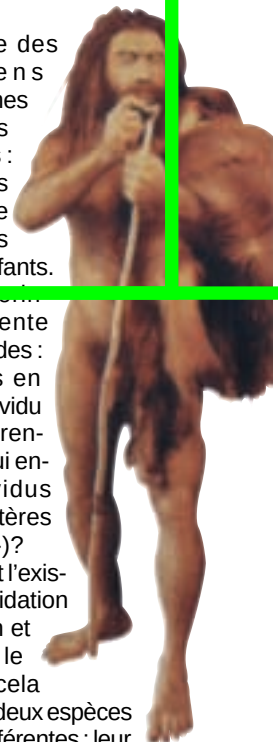
Cet enfant semble donc issu du croisement des deux populations. La date de son inhumation, postérieure d'environ 4 000 ans aux derniers Néandertaliens connus, démontrerait qu'il ne s'agit pas d'un cas isolé, produit unique des improbables amours entre un homme néandertalien et une Juliette Cro-Magnon (ou réciproquement) : il y a eu, dans cette région, une population «hybride» pendant plusieurs milliers d'années.

Cette interprétation est, bien sûr, contestée : les caractères retenus sont-ils vraiment spécifiques de l'une ou de l'autre population ? En outre, les étapes

de la croissance des Néandertaliens comme de celles des hommes modernes anciens sont mal connues : les restes humains de cette époque sont rares et, plus encore, ceux d'enfants.

La variabilité individuelle augmente nos incertitudes : ne serions-nous pas en présence d'un individu exceptionnel (on rencontre, aujourd'hui encore, de tels individus porteurs de caractères «néandertaliens») ?

Que signifierait l'existence d'une hybridation entre Cro-Magnon et Neandertal ? Sur le plan biologique, cela prouverait que les deux espèces ne sont pas très différentes : leur croisement a produit une descendance viable et fertile. En outre, cela confirmerait la similitude de leurs capacités cognitives, que de nombreux archéologues déduisent aujourd'hui de l'étude des comportements. Enfin, si les hommes modernes et les Néandertaliens se sont ainsi mélangés, c'est aussi qu'ils étaient culturellement assez proches pour établir des relations sociales de groupe à groupe. Neandertal, notre ancêtre ?



Voir sans voir

Une brève perturbation risque de masquer une modification importante dans le champ visuel.

Au volant d'une voiture, vous êtes concentré sur la route et sur les véhicules qui vous précèdent. Soudain, une mouche vient finir ses jours sur votre pare-brise ou une tache de boue est projetée. Pendant

cette brève perturbation, les feux de stop de la voiture qui est juste devant se sont allumés : vous ne les avez pas vus ! Votre cerveau n'a pas perçu ce changement dans votre champ de vision. Que s'est-il passé ? Kevin O'Regan,



Kevin O'Regan

1. Regardez cette image pendant trois secondes, puis tournez la page et observez l'autre image durant trois secondes, revenez à cette image, et continuez tant que vous n'avez pas découvert l'élément modifié. En passant d'une image à l'autre, vous vous approchez des conditions d'autres expériences où les images sont séparées par un clignement d'œil ou un écran blanc. Vous pouvez aussi tenter l'expérience avec les exemples d'animations vidéo disponibles sur le site internet <http://nivea.psych.univ-paris5.fr>

Gare aux petits pois!

Des chercheurs de l'INRA ont découvert les propriétés insecticides d'une protéine du petit pois en étudiant les charançons des céréales qui prospéraient sur les châignes et sur les glands, mais pas sur les pois cassés. Les biologistes

ont analysé les pois cassés et identifié une protéine dont on ignorait les

Sommes-nous aussi menacés? Les tests montrent que la protéine conserve son activité insecticide après cuisson, mais qu'elle n'est ni toxique ni allergénique pour l'homme: nous ne sommes pas des charançons, malgré les allégations de Kafka.

Peinture fractale

Dans les années 1940, s'inspirant de Max Ernst, le peintre américain Jackson Pollock développe une technique d'«égouttage»: la peinture tombe sur la toile, posée à terre, par les trous percés dans un récipient ou est projetée à l'aide d'une seringue. Selon trois physiciens de l'Université de New York, à New York, à Sydney et à Melbourne, cette technique permet de suivre l'évolution de sa technique: de dater les toiles et de confondre d'éventuels faussaires: ils ont en effet découvert que les motifs peints par Pollock sont fractals et que leur dimension fractale a augmenté au fil des années, de un en 1943, à 1,72 en 1952.

Pas de la petite bière...

Pourquoi les bières sans alcool ont-elles un goût désagréable? Parce qu'elles contiennent un aldéhyde nommé méthional. Tel est la conclusion des travaux de l'équipe de Philippe Perpète, de l'Université de Louvain, qui a comparé la composition des bières traditionnelles à celle des bières sans alcool. La méthode de production la plus courante de ces bières consiste à utiliser des levures avec un moût à 10°C. À 10°C, à température, les enzymes des micro-organismes sont inefficaces pour transformer les aldéhydes en alcool, et le méthional, dont le seuil de détection est très bas, s'accumule. Les microbiologistes espèrent améliorer le goût des bières sans alcool en supprimant le gène qui code l'enzyme produisant le méthional.

du Laboratoire de psychologie expérimentale de l'Université de Paris, et des collègues de la Société Nissan ont montré que le cerveau n'utilise pas tous les éléments d'une scène pour en construire une représentation mentale et la mémoriser. Ainsi, certaines modifications importantes passent inaperçues lorsqu'elles se produisent pendant une perturbation, même minime.

Les psychologues ont montré à 10 volontaires 48 paires d'images identiques à l'exception d'un élément important, par exemple un avion qui se pose sur un pont d'aviation (voir la figure 1).

Au cours d'une de ces expériences, les images se succèdent à des intervalles réguliers de trois secondes. Lors du passage

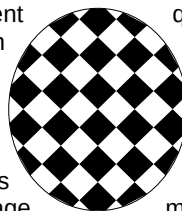
d'une image à l'autre, quelques petites formes parasites (ovales ou carrés) sont superposées pendant 80 millisecondes sur la photographie, mais ne recouvrent pas l'élément modifié. Le diamètre de ces ovales est inférieur à trois pour cent de la largeur de l'image. Les observateurs s'aperçoivent les expérimentateurs dès qu'ils ont décelé le changement. Pourquoi est-ce parfois long?

Les éléments visuels d'une scène sont de deux types: les éléments d'intérêt central et les éléments d'intérêt marginal. Par exemple, dans un portrait, l'identité pourrait être centrale tandis que la couleur de la chemise serait marginale. Les observateurs repèrent dès le premier changement d'image les modifications des éléments d'intérêt central. En revanche, les variations des éléments d'intérêt marginal ne sont détectées qu'à la deuxième projection, voire plus tard. Parfois, le changement n'est pas repéré à l'issue de l'essai qui dure 40 secondes.

Enfin, on a observé que les éléments centraux d'une scène sont mémorisés alors que les éléments marginaux sont oubliés, une seconde expérience a été effectuée. Cette fois, une seule forme parasite apparaît pendant le changement d'image, toujours pendant 80 millisecondes, mais elle recouvre l'élément modifié. Les observateurs identifient immédiatement la nature de la modification lorsqu'elle concerne un élément d'intérêt central, mais ils ne peuvent l'identifier quand elle touche un élément d'intérêt marginal. Seuls les éléments centraux sont mémorisés.

Lors d'une modification de l'image sans perturbation, l'œil n'est pas distrait: il est attiré vers le changement et le voit. En cas de perturbation, le regard est détourné et ne peut compter que sur quelques éléments centraux mémorisés pour comparer les images avant et après la perturbation.

Selon M. S. Regan, le cerveau n'a pas besoin d'une représentation complète du champ visuel puisque le monde extérieur est immédiatement accessible par la vue. Le champ visuel est une sorte de mémoire externe dont le contenu est directement accessible par un mouvement de l'œil ou de l'attention. L'impression de voir un riche panorama serait illusoire.



2. Passez de cette image à celle de la page précédente et identifiez l'élément qui a changé.

Éponges vitreuses

Des verres poreux piègent les déchets radioactifs.

En France, les déchets radioactifs proviennent essentiellement du retraitement des combustibles issus de la production d'électricité d'origine nucléaire. En mettant à profit les propriétés des aérogels, des matériaux très poreux, nous avons mis au point un verre mieux adapté au confinement des déchets radioactifs à vie longue.

Certains noyaux radioactifs, essentiellement les actinides (la famille de l'uranium), ont une demi-vie (le temps nécessaire pour que l'activité radioactive soit réduite de moitié) parfois supérieure à un million d'années. Comment peut-on conserver ces déchets pour qu'ils restent confinés le plus longtemps possible ? En les intégrant dans une matrice de verre.

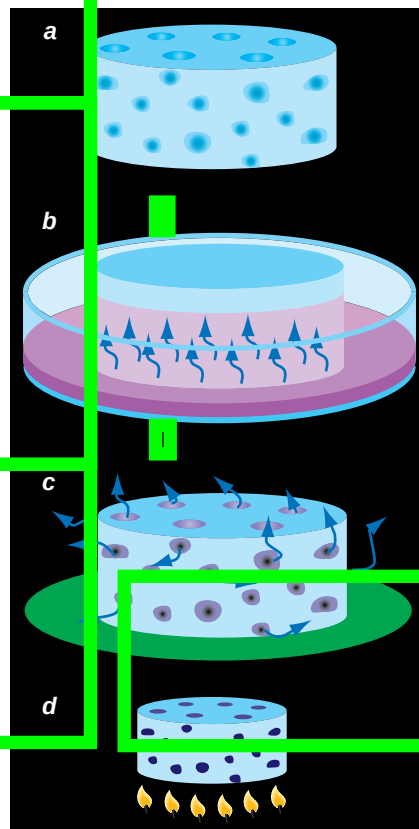
Le verre possède maints avantages. Il est solide et stable lorsqu'il est soumis à l'irradiation ou à des contraintes mécaniques, chimiques et thermiques. Les verres habituellement utilisés sont des borosilicates, composés de silice (SiO_2) et d'une multitude d'éléments, qui représentent 13 pour cent en poids du matériau. Avec les actinides, les nouveaux verres de confinement devront avoir une meilleure stabilité chimique que celle des borosilicates. En particulier, lorsque les verres seront enfouis dans les sites de stockage, on veut éviter que, dans l'éventualité d'un contact avec l'eau, les éléments radioactifs soient dissous.

On améliore la durabilité chimique par l'utilisation de la silice pure, car les éléments qu'on y ajoute habituellement, tels le bore et le sodium qui facilitent la fusion du verre, sont plus solubles dans l'eau que la silice, de sorte que la matrice de verre résiste moins à la corrosion par l'eau. Or, l'obtention de silice pure par un procédé de fusion classique nécessite des températures supérieures à 1 600 °C, qui constituent un obstacle technique et économique. De surcroît, la matrice de verre obtenue par fusion de la silice pure et des éléments radioactifs n'est pas une structure vitreuse de silice pure où seraient piégés les éléments radioactifs, mais une structure vitreuse moins stable dont les composants incluraient les éléments radioactifs.

Pour tourner ces difficultés, nous avons, en collaboration avec J.-L. Duchossoy, du CEA, utilisé des gels de silice, des sortes d'éponges très poreuses. Depuis 1992, on sait fabriquer des aérogels de silice très poreux (contenant plus de 95 pour cent de vide) et dont la surface interne est très grande : jusqu'à 1 000 mètres carrés, dans un gramme d'aérogel. De surcroît, ces matériaux ont la remarquable propriété de se contracter : lorsqu'on les chauffe, les pores se referment.

Comment confine-t-on les éléments radioactifs à l'aide de ces gels ? On commence par dissoudre les substances radioactives dans un solvant dont on imprègne l'éponge de silice. Dans nos essais, nous avons remplacé les actinides, trop radioactifs, par des lanthanides, éléments chimiques aux propriétés analogues. Une fois le solvant évaporé et les éléments déposés à la surface

des pores, il ne «reste plus» qu'à densifier l'éponge imprégnée en la chauffant à une température de l'ordre de 1 100 °C (voir la figure). On obtient alors un ensemble de domaines de silice qui enrobent les éléments radioactifs.



Après fabrication d'un aérogel de silice pure, très poreux (a), on l'imprègne d'une solution de sels d'éléments à confiner (b). On laisse ensuite le liquide s'évaporer (c). Finalement, après chauffage (d), le gel se contracte et enrobe les éléments radioactifs dans une matrice de silice vitreuse.

Les propriétés physico-chimiques de ce matériau vitreux sont prometteuses. Non seulement sa résistance mécanique et sa stabilité thermique sont bonnes (jusqu'à 650 °C), mais les tests de durabilité chimique montrent que la vitesse de dissolution de ce matériau est 60 fois inférieure à celle du verre de confinement borosilicate et plus de 10 fois inférieure à celle de nouvelles matrices de confinement à l'étude (tels les verres basaltiques).

Ces résultats encourageants ne suffisent pas à valider un tel procédé et d'autres aspects doivent être pris en considération. L'auto-irradiation du matériau peut l'endommager, car, même pour des teneurs en éléments radioactifs modérées, des concentrations locales importantes pourraient altérer les propriétés de la matrice au voisinage des domaines de confinement : le rayonnement induit endommagerait la structure du réseau de verre par des

déplacements atomiques, par la formation possible de bulles d'hélium et par une dilatation du matériau.

Ce type de recherches ne concerne pas uniquement les déchets nucléaires. D'autres déchets, tels les résidus d'épuration ou les résidus de l'incinération des ordures ménagères, pourraient bénéficier d'un confinement par un procédé analogue.

J. REYRES, Th. WOIGNIER, J. PHALIPPOU, Laboratoire des verres, CNRS, Montpellier

Horloge biologique

De nouveaux photorécepteurs apparentés à des pigments végétaux sont responsables de la perception des cycles quotidiens.

Du matin jusqu'au soir, les jeunes tournesols vrillent leurs tiges et orientent leurs fleurs vers le soleil pour un éclairage optimal. Cependant, quand on place entre la fleur et le soleil un filtre absorbant le bleu, la fleur ne pivote plus. Cette observation, contée par Charles Darwin, montre que des pigments sensibles à la lumière bleue captent les variations d'intensité lumineuse et renseignent la plante sur le nyctémère, c'est-à-dire sur l'alternance du jour et de la nuit. De cette perception des rythmes quotidiens dépendent la germination, la croissance et la floraison. Les animaux

et les êtres humains sont-ils sensibles à ces variations de luminosité ?

L'équipe de Russell Foster, au Collège impérial de Londres, a montré que les mammifères perçoivent les rythmes journaliers grâce à une horloge biologique dont le mécanisme repose sur des pigments qui n'interviennent pas dans la vision. Plus précisément, l'équipe d'Akira Yasui, à l'Université de Tokyo, a mis en évidence, chez la souris, le rôle de deux protéines apparentées aux pigments bleus des végétaux dans la perception du nyctémère.

Les biologistes britanniques ont étudié des souris dépourvues, après mutations génétiques, des cellules de la rétine responsables de la vision (les cônes et les bâtonnets). Totalement aveugles, elles continuaient néanmoins à percevoir les rythmes journaliers : leur comportement, mesuré par le nombre de tours de roues d'exercice effectués en fonction du moment de la journée, était identique à celui d'une souris normale.

Puis, sur ces mêmes souris, ils ont étudié l'influence d'une lumière monochromatique bleue sur la production de mélatonine, une hormone synthétisée par une région de la base du cerveau, nommée le noyau suprachiasmatique, qui commande la température corporelle et les cycles veille-sommeil. Chez une souris normale, la synthèse de mélatonine est inhibée par la lumière : elle l'est également chez les souris dépourvues de cônes et de bâtonnets. De ces deux expériences, on conclut que la perception du nyctémère est indépendante des pigments de la vision et nécessite la présence d'autres récepteurs sensibles aux variations de luminosité.

L'équipe japonaise s'intéressait aux photolyases, des protéines qui réparent l'ADN endommagé par une exposition aux ultraviolets B : elles sont activées par une lumière bleue ou par des ultraviolets A. Ils ont découvert les protéines Cry1 et Cry2, synthétisées dans toutes les cellules et qui, outre leur fonction réparatrice, ressemblent aux cryptochromes, des pigments végétaux sensibles aux variations de lumière. Les biologistes ont alors créé trois espèces de souris mutantes chez qui, soit Cry1, soit Cry2, soit les deux protéines n'étaient pas synthétisées. Ils ont étudié le comportement circadien de ces souris par leur activité locomotrice dans une roue à exercice. Dans des conditions de laboratoire, où le jour et la nuit durent chacun 12 heures, les trois espèces ont un cycle régulier de 24 heures.

En revanche, dans l'obscurité totale, alors que les premières ont un cycle d'activité réduit d'environ une heure, le rythme des deux autres augmente d'une heure. Les protéines Cry1 et Cry2 ont des fonctions antagonistes qui régulent l'horloge biologique : Cry1 accélère le cycle, Cry2 le retarde. Les souris de la troisième espèce perdent tout périodicité de comportement et n'ont plus aucun « rythme de vie ». Les biologistes concluent que les protéines Cry1 et Cry2 captent les variations lumineuses du jour et de la nuit.



Les végétaux et les animaux vivent au rythme de l'alternance du jour et de la nuit. Ces deux règnes ont des récepteurs photosensibles qui appartiennent à la famille des cryptochromes.

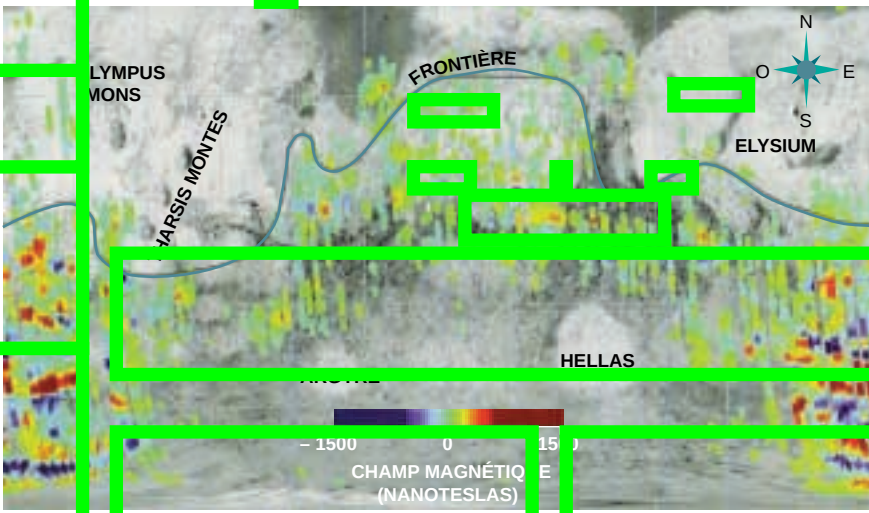
Relique de tectonique

Les hauts plateaux de Mars seraient-ils des restes de la croûte océanique primitive ?

Depuis septembre 1997, la sonde américaine Mars Global Surveyor est en orbite autour de la planète Mars. À bord de cette sonde, une expérience de mesure du champ magnétique, menée conjointement par les équipes américaines et notre laboratoire, a montré que la planète Mars n'a pas de champ magnétique global, contrairement à la Terre et aux planètes géantes.

En revanche, cette expérience a révélé de fortes sources magnétiques localisées dans la croûte martienne, indice que, par le passé, la planète Mars engendrait son propre champ magnétique par un phénomène de dynamo interne résultant de mouvements dans un cœur métallique en fusion. Afin de visualiser ces « anomalies magnétiques », nous avons enregistré la composante radiale (verticale) du champ magnétique lors des survols de la sonde à des altitudes inférieures à 200 kilomètres (voir la figure).

D'où proviennent ces anomalies ? Lorsque l'on superpose la carte des anomalies et celle de la géologie martienne, on constate que la plus grande partie des sources magnétiques de la croûte est située sur les terrains riches en cratères d'impact, sur les hauts plateaux de



Carte géologique de Mars superposée aux mesures de la composante radiale du champ magnétique à des altitudes inférieures à 200 kilomètres. La frontière géologique caractéristique est représentée par une ligne continue. La majorité des sources magnétiques crustales se trouvent au Sud de la frontière qui sépare les terrains cratérisés du Sud des terrains du Nord (le bassin Hellas a un diamètre de 2 000 kilomètres).

l'hémisphère Sud, près de la frontière qui sépare ces hauts plateaux et les plaines relativement jeunes et peu épaisses, du Nord.

La plupart de ces anomalies magnétiques sont associées aux terrains les plus marqués par les cratères, donc les plus anciens. Aucune source magnétique n'est associée à Tharsis, Elysium, Valles Marineris, ni aux ensembles volcaniques principaux de Mars, tel Olympus Mons, ni aux grands impacts des bassins Hellas et Argyre, plus jeunes. La dynamo martienne avait sans doute déjà cessé de fonctionner lorsque ces bassins ont été creusés par l'impact de météorites, il y a environ 3,9 milliards d'années.

Autre propriété étonnante de ces sources magnétiques intenses : elles sont alignées selon une direction Est-Ouest. Ces sources peuvent être représentées par un groupe d'une vingtaine de bandes uniformément aimantées de 200 kilomètres de large, de 30 kilomètres de profondeur et de grande extension longitudinale. Leur polarité s'inverse d'une bande à l'autre. Cette aimantation très ancienne a dû se former lorsque la croûte de Mars était encore mince.

Sur Terre, de telles bandes de polarité alternée sont observées sur les dorsales médio-océaniques, près des épanchements magmatiques au fond des océans. Elles se sont formées à

partir des cratères qui témoignent en surface. Les cristaux de magnétite contenus dans la lave s'orientent dans la direction du champ magnétique ambiant, juste avant que la lave ne se solidifie en une croûte océanique. Ainsi se crée, au cours de l'évolution de la Terre et des inversions de son champ magnétique, une série de bandes d'aimantation alternée.

Les plaques terrestres se meuvent de quelques centimètres par an et il y a quelques inversions par million d'années, d'où une largeur de bande de l'ordre de dix kilomètres. Mars pourrait avoir produit de la même façon les

bandes observées (200 kilomètres de large) à condition que son champ magnétique ait inversé sa polarité beaucoup plus récemment qu'aujourd'hui sur Terre ou que la vitesse d'épanchement de la croûte martienne ait été bien supérieure à ce qu'elle est sur Terre aujourd'hui.

Forts de cette comparaison, nous pensons que ces bandes magnétiques se seraient formées très tôt dans l'histoire de la planète, lors d'un épisode de tectonique des plaques et d'épanchement magmatique. Les hauts plateaux de Mars constitueraient alors les restes de la croûte océanique primi-

tive, modifiée par des impacts postérieurs et par des événements thermiques tels que l'activité engendrée lors du refroidissement de la croûte martienne.

Toutefois, l'évolution de la planète Mars reste mal connue : aucune théorie n'explique, par exemple, l'origine de la frontière. S'il se vérifie que ces bandes magnétiques résultent d'une tectonique des plaques martiennes, il faudra remplacer le modèle de la plaque unique admis jusqu'à aujourd'hui.

Diction /IGNES et Christian MAZELLE, Observatoire Univ. Paul Sabatier, Toulouse

Le jongleur d'eau

Certaines fontaines présentent un étrange comportement oscillatoire.

Dans la mythologie grecque, les fontaines sont le royaume des naïades. Ces dernières sont des êtres fantasques et imprévisibles : d'où les oscillations que l'on observe parfois dans les jets d'eau. Comment expliquer les variations périodiques de hauteur d'eau de certaines fontaines? Le physicien marseillais Christophe Clanet a percé le mystère des fontaines oscillantes : l'eau se comporte comme les balles d'un jongleur.

En 1977, à Grenoble, Emmanuel Villermaux effectua les premiers enregistrements de fontaines oscillantes et identifia une périodicité, dans certains cas. Lesquels? Pour répondre à cette question, Ch. Clanet a repris l'étude en étudiant l'influence du diamètre de l'injecteur et de la vitesse d'éjection.

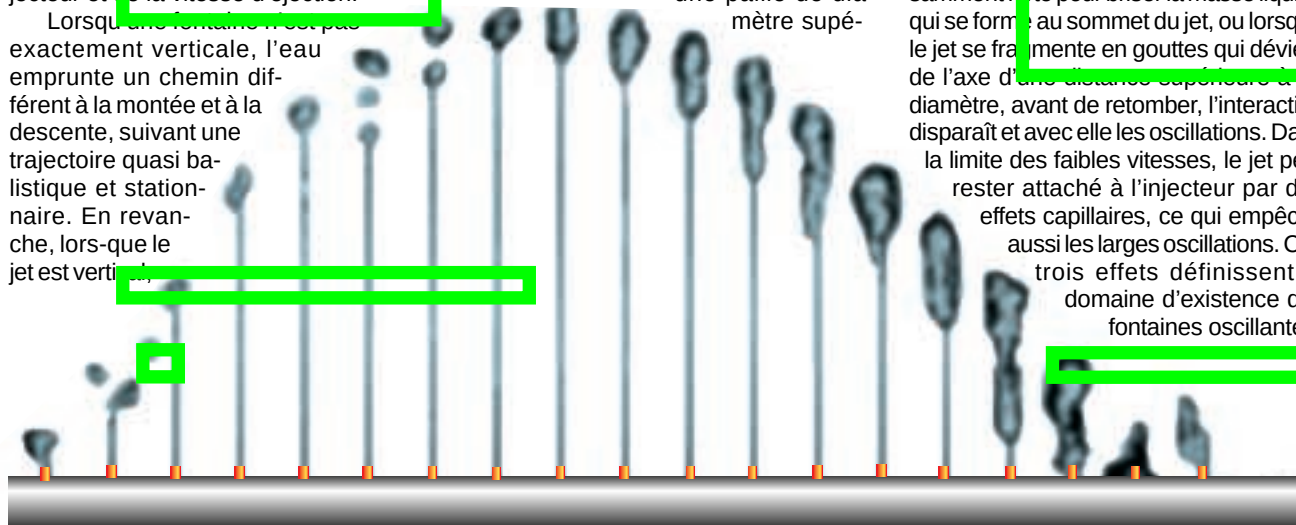
Lorsqu'une fontaine n'est pas exactement verticale, l'eau emprunte un chemin différent à la montée et à la descente, suivant une trajectoire quasi balistique et stationnaire. En revanche, lorsque le jet est vertical,

le fluide qui redescend interagit avec le fluide qui monte ; ces interactions engendrent parfois des oscillations dont l'amplitude est de l'ordre de la hauteur de la fontaine.

Comment savoir quand ces oscillations sont périodiques? Ch. Clanet enregistra l'évolution du sommet du jet au cours du temps. En répétant la procédure pour différentes vitesses et différents diamètres, on observe que la fréquence caractéristique des oscillations diminue avec la vitesse d'éjection de l'eau et varie peu avec le diamètre tant que celui-ci reste de l'ordre de la longueur capillaire. Cette longueur est la distance pour laquelle les forces de capillarité sont du même ordre d'intensité que les forces de gravité. Sur l'interface eau/air, la longueur capillaire est d'environ quatre millimètres. La capillarité a pour conséquence que, lorsqu'une paille de diamètre inférieur à quatre millimètres est approchée de la surface de l'eau dans un verre, l'eau monte dans la paille, tandis que pour une paille de diamètre supé-

rieur, l'eau reste au même niveau que la surface. Afin de comprendre l'origine physique des oscillations, Ch. Clanet a analysé l'influence des divers facteurs et il propose aujourd'hui le «modèle du jongleur» : imaginons que le jet soit composé de gouttes isolées, lancées successivement vers le haut, comme le sont les balles par un jongleur. Si la période de lancer des balles est suffisamment courte, lorsque la balle supérieure redescend, elle heurte la balle qui la suit ; en utilisant la conservation de la masse et de l'impulsion lors de la collision, on détermine le temps de retour des balles dans la main du jongleur. En faisant tendre vers zéro l'intervalle de temps entre deux balles successives, on peut comparer la fréquence calculée à celle qui est mesurée expérimentalement sur les fontaines. Cette comparaison révèle un bon accord entre la théorie et l'expérience.

Cet accord perdure tant que le fluide ascendant interagit avec le fluide descendant. Lorsque l'inertie du jet est suffisamment forte pour briser la masse liquide qui se forme au sommet du jet, ou lorsque le jet se fragmente en gouttes qui dévient de l'axe d'une distance supérieure à un diamètre, avant de retomber, l'interaction disparaît et avec elle les oscillations. Dans la limite des faibles vitesses, le jet peut rester attaché à l'injecteur par des effets capillaires, ce qui empêche aussi les larges oscillations. Ces trois effets définissent le domaine d'existence des fontaines oscillantes.



États successifs d'une fontaine oscillante.

Origine extraterrestre ?

Des bactéries résistent aux impacts de météorites.

La vie a-t-elle vu le jour sur Terre, dans une soupe primitive, ou, au contraire, a-t-elle commencé ailleurs, puis essaimé sur Terre, transportée par les météorites ? Cette question éternelle déchire les exobiologistes depuis des décennies. À l'aide d'expériences de balistique, nous avons montré que même des micro-organismes complexes, telles les levures, résistent à des accélérations analogues à celles qui sont subies par les météorites qui atteignent la Terre.

Dans la Grèce antique, Anaxagore postule déjà la dissémination du vivant dans l'Univers, mais c'est seulement au XIX^e siècle, après que Pasteur a montré l'absence de génération spontanée, que l'hypothèse de la panspermie est élaborée. Hermann Richter, Hermann von Helmholtz et Lord Kelvin proposent que des organismes voyagent à l'intérieur de météorites (lithopanspermie). Dans l'impossibilité d'expliquer comment des germes peuvent être logés dans une météorite, le concept est modifié par le chimiste Svante Arrhenius : poussées par la pression du rayonnement (radiopanspermie), les bactéries seraient échangées entre systèmes planétaires.

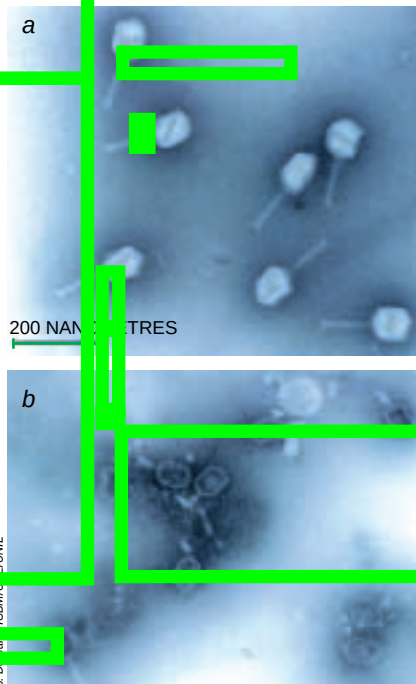
Au cours du XX^e siècle, la constatation que le rayonnement solaire ultraviolet tue rapidement les bactéries relègue la panspermie dans l'oubli, mais, depuis la découverte de météorites martiennes sur Terre, la lithopanspermie est à nouveau débattue : des fragments de surface, arrachés à une planète par un impact météorique explosif, véhiculeraient la vie.

Les météorites arrachées à la croûte martienne sont captées par la Terre et s'y écrasent après quelques millions d'années. Des expériences montrent que, logés dans une météorite, les bactéries survivent durant une telle durée aux particules solaires et aux rayonnements spatiaux, tel le rayonnement solaire ultraviolet. Des spores et des bactéries isolées dans de l'ambre vieux de 25 à 40 millions d'années ont un chromosome encore fonctionnel. Enfin, le froid et le vide de l'espace sont des conditions idéales pour un stockage durable. Seule la résistance bactérienne aux stress mécaniques d'un tel transport n'avait pas encore été testée.

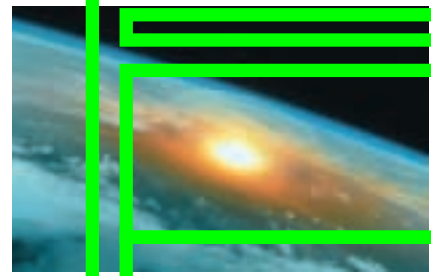
Retraçons le scénario de capture : un rocher de l'ordre du kilomètre de diamètre percute Mars et met en orbite des fragments de la planète. Les accélérations subies lors de la mise en orbite sont égales à plus de 10 000 fois l'accélération de la pesanteur (g).

Ces fragments sont ensuite captés par la Terre à une vitesse comprise entre 11 et 70 kilomètres par seconde. Des objets de plusieurs tonnes, peu ralentis par l'atmosphère, gardent une vitesse supersonique et explosent au moment de l'impact libérant leur formidable énergie cinétique sous forme de chaleur, fatale aux éventuelles bactéries transportées. De même, les objets de quelques centimètres de diamètre se consument intégralement pendant la traversée de l'atmosphère (les étoiles filantes), stérilisant toute forme de vie.

En revanche, les micrométéorites d'un diamètre inférieur à quelques millimètres convertissent leur énergie cinétique en rayonnement et tombent très lentement. Elles constituent un vecteur potentiel pour le transfert de matière organique. De même, une météorite de diamètre compris entre quelques centimètres et un mètre est suffisamment ralentie par l'atmosphère pour que son énergie cinétique soit dissipée, principalement par chauffage de l'air, et aussi par fusion d'une couche de moins d'un centimètre d'épaisseur. L'intérieur de la météorite reste alors froid. La vitesse résiduelle est



On compare la survie des micro-organismes à celle de virus qui servent de «contrôles négatifs». Alors que les levures résistent aux impacts, les virus T4 sont détruits : avant le tir, ils sont intacts (a), mais après le choc (b), ils sont cassés et leur ADN est dispersé.



Chute d'une météorite dans l'océan.

celle d'une chute libre (100 à 250 mètres par seconde) et si la météorite heurte, par exemple, une surface de sable, elle subit une décélération de quelques milliers de g , lors de laquelle les bactéries pourraient être préservées.

Pour reproduire le stress mécanique subi par de petites météorites, nous avons procédé à des expériences balistiques. Dans une carabine à air comprimé, le projectile subit une accélération de 100 000 g , bien supérieure à celle d'un transfert planétaire. Nous avons déposé des levures, des bactéries en croissance, des bactéries sans paroi et des virus qui s'attaquent aux bactéries (bactériophages) sur les projectiles de la carabine. Après avoir tiré ces projectiles à une vitesse de 300 mètres par seconde dans des bouteilles contenant du sable stérile, nous avons vérifié la survie et l'intégrité physique de ces micro-organismes : les levures et les bactéries ont, pour la plupart, résisté au choc de décélération de 300 000 g . Seules les bactéries sans paroi et les bactériophages ne résistent pas à ces violentes décéléérations. Ces résultats balistiques montrent que des organismes unicellulaires, logés à l'intérieur de petites météorites, survivraient aux contraintes mécaniques d'un transfert interplanétaire.

L'ensemencement de notre planète expliquerait la rapidité de l'émergence de la vie terrestre. Si cette hypothèse est confirmée, la vie que nous connaissons proviendrait soit d'une autre planète de notre Système solaire, soit d'un autre système planétaire. Les étoiles naissent par centaines en amas et les échanges de comètes sont intenses durant la période initiale de l'accrétion planétaire, ce qui aurait favorisé une diffusion galactique de la vie.

Indépendamment de la question de l'origine de la vie terrestre, cette capacité à certainement permis aux premiers organismes terrestres de survivre aux violents impacts des débuts de la Terre, capables de vaporiser les océans : mises en orbite par de tels événements, les bactéries auraient réensemencé la surface de notre planète dès la réapparition de conditions favorables à leur prolifération.

C.-A. ROTEN, Institut de génétique et de biologie microbiennes, Lausanne

La multiplication des neurones chez l'adulte

GERD KEMPERMANN • FRED GAGE

Contrairement à ce qui était admis, des neurones sont produits chez l'homme même à l'âge adulte. On espère utiliser cette capacité du cerveau pour mieux traiter les maladies neurologiques.

Quand on se coupe, la blessure se referme en quelques jours. Quand on se casse une jambe, les os se ressoucient. Presque tous les tissus humains se réparent ainsi, tout au long de la vie. Des cellules remarquables, les cellules souches, sont en grande partie responsables de cette activité de réparation. Ces cellules ressemblent à celles d'un embryon : elles peuvent se multiplier presque indéfiniment et engendrer non seulement des copies conformes d'elles-mêmes, mais aussi différents types d'autres cellules. Les cellules de la moelle osseuse, par exemple, produisent toutes les cellules du sang : les globules rouges, les plaquettes et divers types de globules blancs. Les constituants de la peau, du foie ou des muqueuses de l'intestin sont issus d'autres cellules souches.

Le cerveau de l'homme adulte compense parfois certaines lésions par de nouvelles connections entre les neurones épars. Toutefois, on croyait qu'il ne se réparait pas, car il était dépourvu des cellules souches qui assureraient la régénération neuronale.

Erreur ! En novembre 1998, Peter Eriksson, de l'Université de Göteborg, l'un d'entre nous (Fred Gage), à l'Insti-

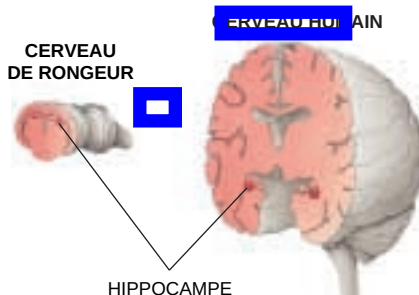
tut Saltsjö, et quelques collègues avons découvert que de nouveaux neurones apparaissent, chaque jour, dans le cerveau humain adulte. Nous avons trouvé cette régénération dans l'hippocampe, une zone cérébrale essentielle pour la mémoire et pour l'apprentissage. L'hippocampe n'est pas le lieu de stockage des souvenirs, mais il participe à ce stockage : les personnes dont l'hippocampe est endommagé se souviennent des informations enregistrées avant leur accident, mais elles ont des difficultés à acquérir de nouveaux souvenirs.

Le nombre de nouveaux neurones est faible par rapport au nombre total de neurones du cerveau, mais la découverte de ces cellules, à laquelle s'ajoutent des résultats prometteurs obtenus sur des animaux, ouvre de nouvelles perspectives médicales encourageantes. Les cellules souches semblent fabriquer de nouveaux neurones dans une autre région du cerveau et être présentes,

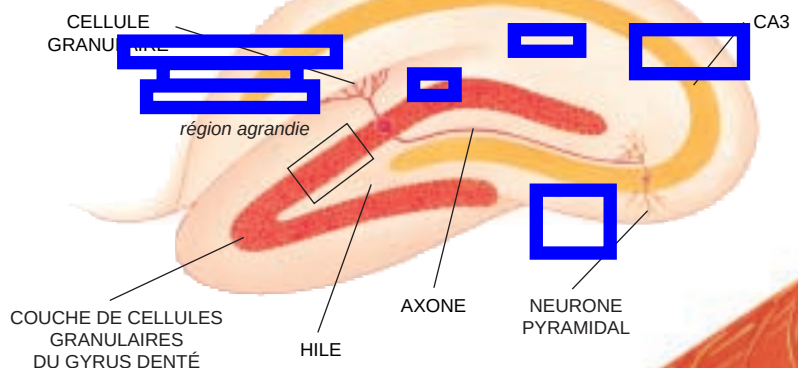
mais sans se multiplier, dans d'autres zones. Le cerveau adulte, qui se répare si mal, possède peut-être un grand pouvoir de multiplication des neurones. Si l'on savait stimuler les cellules souches pour former des neurones fonctionnels dans certaines régions du cerveau, on pourrait soulager les personnes dont les neurones sont lésés ou détruits par la maladie d'Alzheimer, par la maladie de Parkinson, par un traumatisme ou par un accident vasculaire cérébral.

Premiers indices, premiers doutes

Bien que les neurologues aient été surpris de découvrir la production de neurones dans le cerveau humain adulte, plusieurs études sur des mammifères adultes l'avaient laissé supposer. En 1965, à l'Institut de technologie du Massachusetts, Joseph Altman et Gopal Das avaient déjà observé le phénomène dans



HIPPOCAMPE



Tomo Narashima

l'hippocampe de rats adultes, précisément dans l'aire nommée gyrus denté, où la neurogenèse se produit aussi chez l'homme.

D'autres études ont confirmé ces résultats, mais les neurobiologistes n'y voyaient pas la preuve d'une neurogenèse ni d'un potentiel de régénération notables dans le cerveau des mammifères adultes. Les méthodes alors disponibles ne permettaient pas de préciser le nombre de cellules apparues, ni de prouver qu'il s'agissait bien de neurones. Le concept de cellules souches cérébrales n'ayant pas encore été formulé, les neurobiologistes pensaient qu'il s'agissait des cellules nerveuses matures qui devaient se répliquer. De surcroît, personne ne se serait hasardé à parler de neurogenèse dans le cerveau humain avant d'avoir mis en évidence le phénomène chez les grands singes, génétiquement et physiologiquement plus proches de nous que les autres mammifères.

Le champ des recherches ne progressa guère avant le milieu des années 1980, quand Fernando Nottebohm, de l'Université Rockefeller, relança le débat avec les résultats étonnants qu'il obtint sur des canaris adultes : une neurogenèse se produit dans les centres du cerveau dédiés à l'apprentissage du chant et s'accroît pendant les saisons où les oiseaux adultes apprennent à chanter ; de plus, la formation des neurones dans l'hippocampe augmente quand les oiseaux ont beaucoup d'informations à mémoriser, par exemple quand ils doivent se souvenir de tous les itinéraires qui aboutissent aux cachettes où ils stockent leur nourriture. Ces résultats ont soulevé à nouveau la question de la capacité de réparation du cerveau des mammifères adultes.

L'optimisme fut de courte durée. Pasko Rakic et ses collègues de l'Université Yale furent les premiers à étudier la neurogenèse chez les primates adultes. Ils n'observèrent aucune neurogenèse dans le cerveau de singes rhésus adultes. De plus, les biologistes savaient que le potentiel de neurogenèse n'avait cessé de diminuer au cours de l'évolution, à mesure que le cerveau est devenu plus complexe : contrairement aux mammifères, les lézards et autres animaux inférieurs subissent une régénération neuronale massive quand leur cerveau est endommagé. L'apparition de neurones dans un cerveau complexe semblait devoir perturber la circulation ordonnée des signaux le long des voies déjà établies.

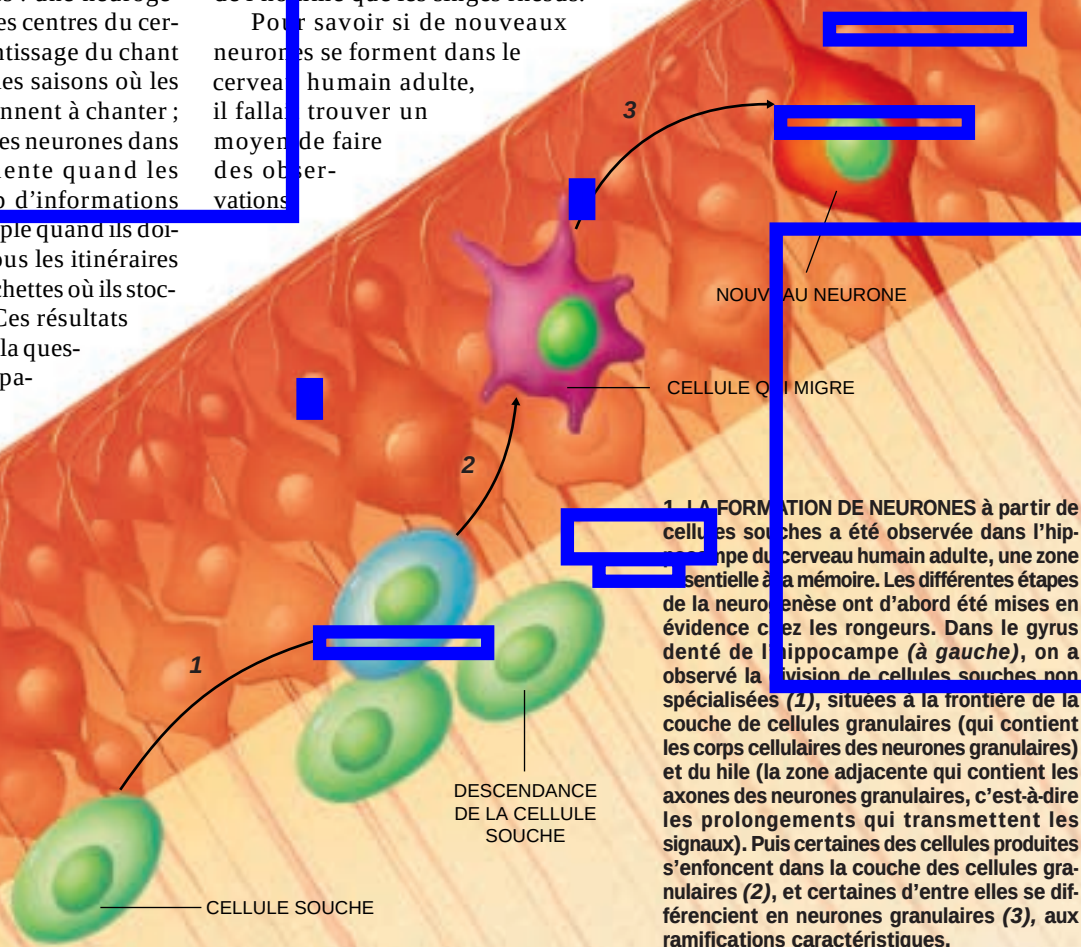
Les premiers doutes ont émergé il y a seulement quelques années. D'abord, en 1991, Elizabeth Gould, Bruce McEwen et leurs collègues de l'Université Rockefeller, et Eberhard Fuchs, du Centre de primatologie de Göttingen, observèrent une neurogenèse dans l'hippocampe d'un petit rongeur arboricole proche des primates. Puis, en mars 1998, ils ont découvert ce phénomène chez les marmosets, des primates plus éloignés de l'homme que les singes rhésus.

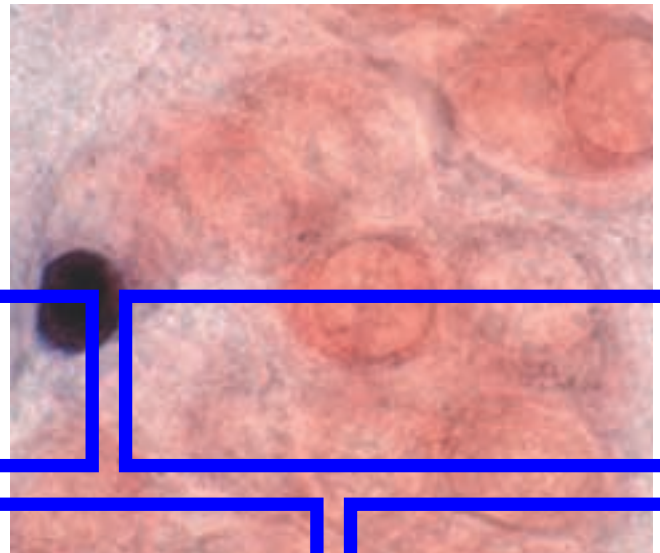
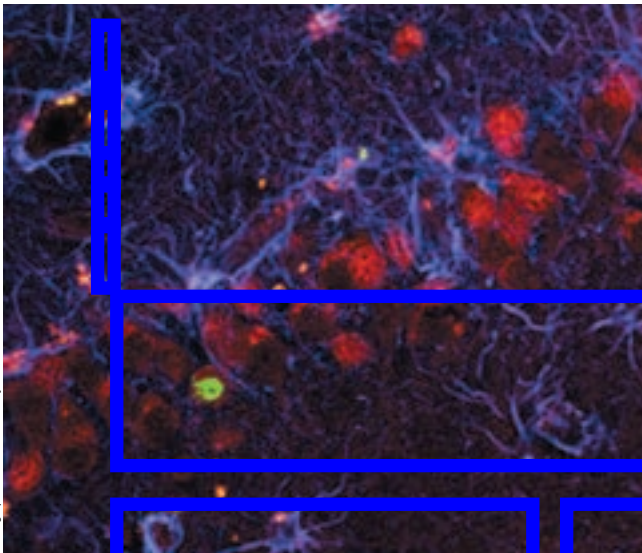
Pour savoir si de nouveaux neurones se forment dans le cerveau humain adulte, il fallait trouver un moyen de faire des observations

directes. Chez l'animal, on explore la neurogenèse en se fondant sur la duplication des chromosomes avant la division cellulaire ; chaque cellule fille reçoit un jeu complet de chromosomes. Quand on injecte aux animaux un marqueur qui se fixe sélectivement sur l'ADN des cellules prêtes à se diviser, ce marqueur s'intègre à l'ADN des cellules filles, puis se transmet aux descendantes de ces cellules, puis aux descendantes de ces cellules, et ainsi de suite dans les générations successives de cellules.

Cancer et neurogenèse

Après quelque temps, certaines cellules de cette lignée se différencient, c'est-à-dire qu'elles se spécialisent, devenant un type particulier de neurones ou des cellules gliales (l'autre type de cellules du système nerveux). La différenciation achevée, les biologistes prélèvent le cerveau et le coupent en minces





2. DE NOUVEAUX NEURONES se forment dans l'hippocampe de personnes adultes (le cerveau de personnes décédées d'un cancer a été analysé). Sur ces photographies, les neurones apparaissent en rouge. La coloration verte dans l'un des neurones de l'image de gauche et la tache foncée sur l'image de droite révèlent que les chromosomes de ces deux cellules contiennent une substance injectée aux malades par des cancérologues qui voulaient évaluer

la croissance de leur tumeur. Ce marqueur s'intègre uniquement à l'ADN des cellules en cours de division (par exemple, les cellules souches), mais ne se fixe pas sur les cellules qui ne se divisent pas. Par conséquent, la présence de ce marqueur indique que les cellules marquées ne se sont différenciées en neurones qu'après l'administration du marqueur, alors que les personnes étaient déjà âgées.

lamelles d'un colorant révèle la présence de neurones ou de cellules gliales que l'on observe au microscope. On admet que les cellules portant le marqueur de division cellulaire et ayant les caractéristiques anatomiques et chimiques des neurones se sont différenciées en cellules nerveuses après l'introduction du marqueur dans l'organisme. Comme les neurones qui étaient complètement différenciés avant l'injection du marqueur ne se divisent pas, ils n'incorporent pas le marqueur dans leur ADN.

Évidemment, on ne peut appliquer cette méthode à l'homme, mais P. Eriksson trouva une solution. En parlant un jour avec un cancérologue, il apprit que la substance que nous avons utilisée comme marqueur pour les cellules en cours de division chez les animaux – le bromodésoxyuridine – avait été administrée à des personnes atteintes d'un cancer de la langue ou du larynx en phase terminale, pour mesurer la vitesse de croissance des tumeurs.

L'analyse de l'hippocampe de ces personnes après leur décès, permettrait-elle aux neurobiologistes de voir si certains neurones portaient le marqueur de l'ADN? La présence du marqueur révélerait des neurones formés après l'administration de la substance. Autrement dit, un résultat positif prouverait que des neurones ont été produits, vraisemblablement par prolifération et par différenciation de cellules souches, chez

des adultes. Entre janvier 1996 et février 1998, P. Eriksson examina le cerveau de cinq de ces personnes décédées à des âges compris entre 57 et 72 ans. Les cinq cerveaux contenaient de nouveaux neurones et, plus précisément, des cellules granulaires du gyrus denté! À peu près au même moment, deux autres équipes montraient que des cellules nerveuses se forment dans l'hippocampe des singes rhésus adultes.

Des neurones fonctionnels?

Les nouveaux neurones étaient-ils fonctionnels? Mettaient-ils des messages corrects et traitaient-ils correctement les messages qu'ils recevaient? Où se trouvaient les cellules souches capables de se différencier en neurones? Comme il avait été montré que la neurogenèse dans l'hippocampe des rongeurs ressemble à celle du cerveau humain, on put reprendre les recherches sur les rats et sur les souris.

Des travaux sur des rongeurs avaient révélé que de nouveaux neurones apparaissent tout au long de la vie des animaux dans l'hippocampe et dans les zones cérébrales du système olfactif. Des cellules souches sont également présentes dans certaines zones du cerveau, telles que le septum (qui participe aux émotions et à l'apprentissage), le striatum (qui intervient dans les activités motrices de précision) et la moelle épinière. Toutefois,

dans les conditions normales, seules les cellules souches de l'hippocampe et du système olfactif semblent produire de nouveaux neurones.

Si l'on voyait à travers l'avant du cerveau, le gyrus denté de l'hippocampe paraîtrait comme une couche mince et foncée ayant la forme d'un «V» incliné. Ce V contient le corps cellulaire des neurones granulaires (c'est-à-dire la partie de la cellule où se trouve le noyau). À l'intérieur du V, une couche adjacente, nommée le hile, est constituée d'axones, les longues ramifications qui véhiculent les signaux : les cellules granulaires relaient les signaux qu'elles reçoivent jusqu'à une station relais de l'hippocampe, nommée CA3.

Les cellules souches qui engendrent des cellules granulaires sont à la limite du gyrus denté et du hile ; elles se divisent sans cesse. Les cellules filles sont identiques aux cellules mères originelles. Apparemment, beaucoup d'entre elles meurent peu de temps après avoir été produites, mais quelques-unes migrent plus profondément dans la couche de cellules granulaires. Elles prennent alors l'apparence des cellules granulaires voisines, qui se terminent par des ramifications prêtes à recevoir des signaux et à en envoyer. Leurs axones se prolongent le long des trajets déjà utilisés par les cellules voisines.

Les cellules souches qui engendrent de nouveaux neurones dans le système olfactif tapissent les parois de cavités

pleines de liquide, nommées les ventricules latéraux. Arturo Alvarez-Buylla et ses collègues de l'Institut Rockefeller ont montré que certaines cellules filles de ces cellules souches migrent jusqu'au bulbe olfactif, où elles prennent les caractéristiques des neurones environnants.

Puisque les nouveaux neurones ressemblent aux neurones d'origine dans ces deux aires cérébrales, ils se comportent vraisemblablement comme eux. Comment le prouver? En étudiant les effets de l'environnement sur l'anatomie du cerveau et sur l'apprentissage.

Au début des années 1960, Mark Rosenzweig et ses collègues de l'Université de Berkeley améliorèrent les conditions spartiates d'élevage de rongeurs, en les plaçant dans de très grandes cages avec d'autres rongeurs. Les animaux pouvaient explorer un environnement continuellement renouvelé, tourner dans des roues et jouer avec divers objets.

Cette amélioration des conditions de vie a des conséquences étonnantes : les animaux jouissant d'une vie plus agréable ont un cerveau légèrement plus lourd que les animaux enfermés dans de petites cages, certaines de leurs structures cérébrales sont plus épaisses, leurs concentrations en neurotransmetteurs (des molécules qui assurent la communication entre les neurones) sont différentes, les connexions entre neurones sont plus nombreuses, avec davantage de ramifications sur les axones. De surcroît, ils réussissent mieux aux tests d'apprentissage : ils apprennent, par exemple, plus facilement à se repérer dans un labyrinthe.

Depuis ces expériences, les neurobiologistes ont acquis la conviction qu'une amélioration de l'environnement des rongeurs adultes agit sur les connexions neuronales, augmentant la puissance du cerveau. Toutefois, pendant des années, personne n'a admis que la production de nouveaux neurones dans le cerveau adulte pouvait expliquer l'augmentation des performances.

Les récentes explorations de la neurogenèse ont montré que des modifications de l'environnement agissent sur la neurogenèse de l'adulte. En 1997, nous avons montré que des souris adultes élevées dans de très bonnes conditions ont plus de nouvelles cellules granulaires dans le gyrus denté (60 pour cent de plus) que les animaux témoins génétiquement identiques.

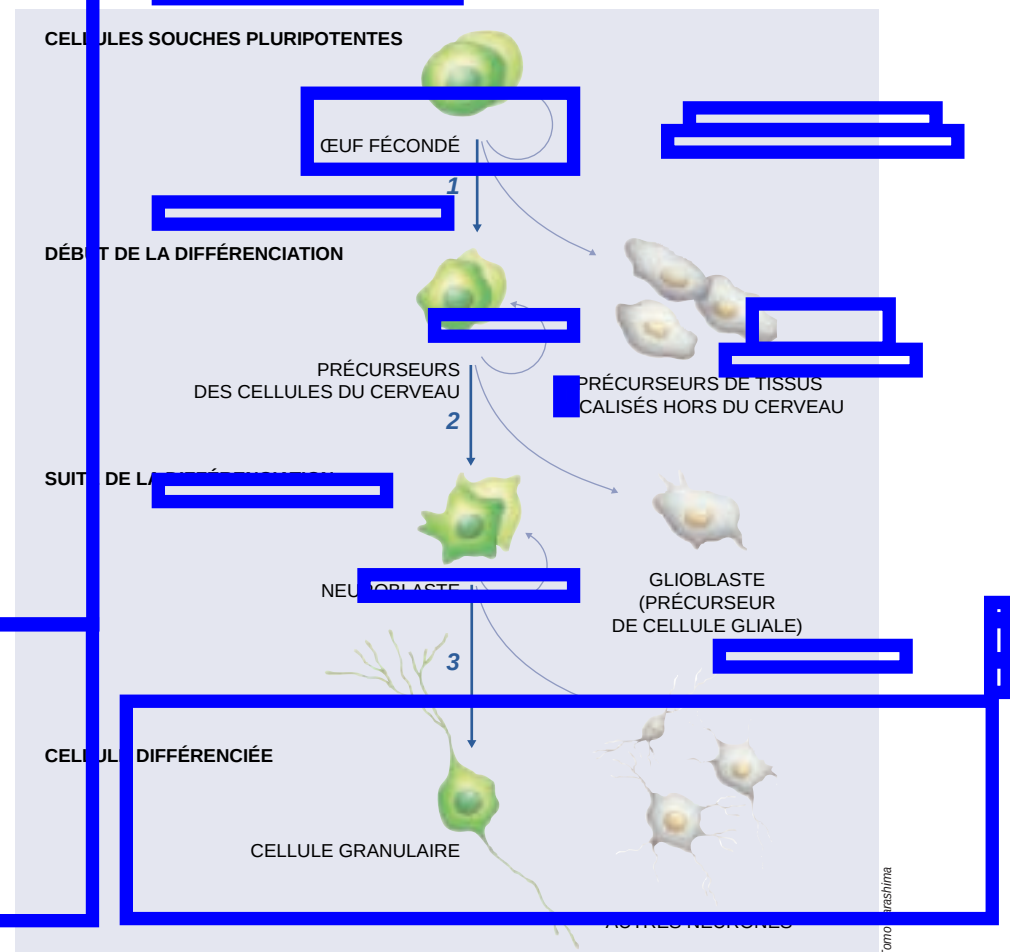
Leurs capacités d'apprentissage sont également meilleures (dans le test, elles devaient retrouver leur chemin en sortant d'une piscine). L'amélioration de l'environnement facilite la neurogenèse et les performances d'apprentissage même chez les souris très âgées, dont la production de neurones est bien inférieure à celle des adultes jeunes.

Nous ne prétendons pas que les nouveaux neurones sont les seuls responsables des améliorations comportementales constatées, car les modifications des connexions et celles du micro-environnement chimique dans les aires cérébrales concernées y participent certainement aussi. Inversement, il serait très surprenant que ni cette production massive de neurones ni la préservation de la neurogenèse chez l'adulte au cours de l'évolution ne jouent un rôle.

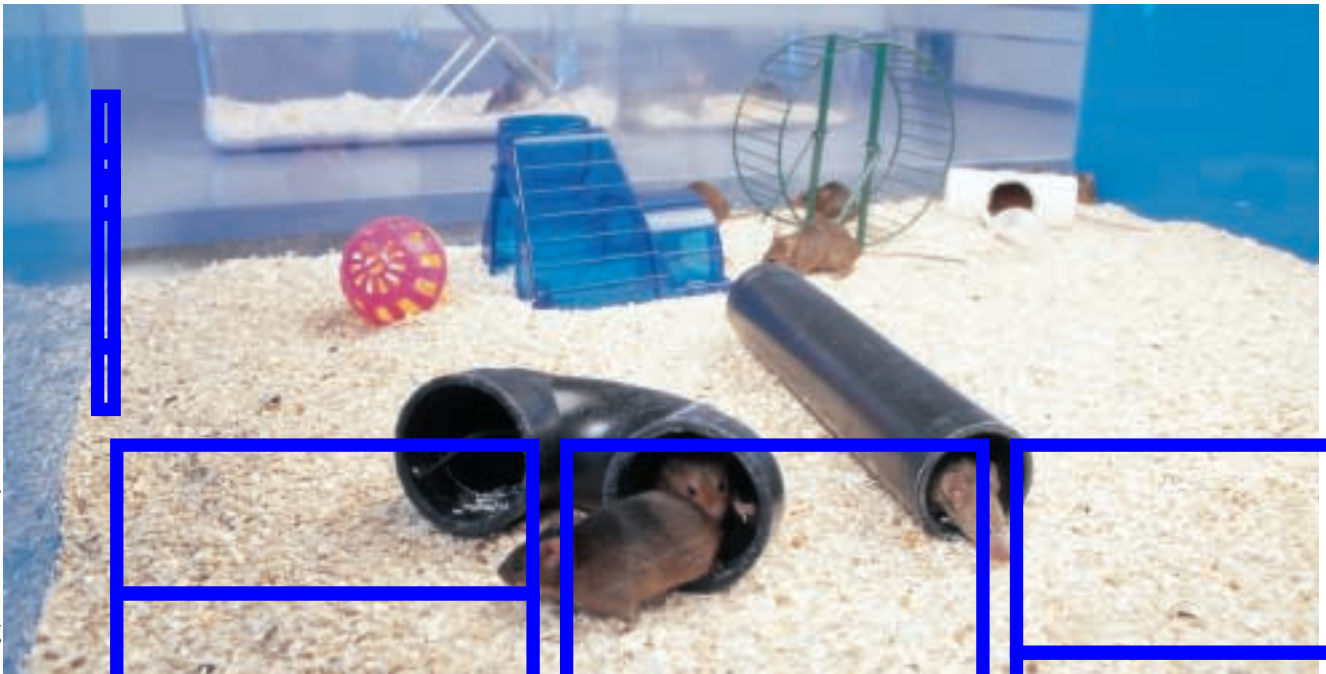
La maîtrise de la neurogenèse

Si les neurones régulièrement produits dans le cerveau humain adulte sont fonctionnels, la maîtrise de leur différenciation aiderait à la régénération des neurones lésés. Hormis l'amélioration de l'environnement, d'autres facteurs semblent influencer sur la neurogenèse.

Celle-ci se déroule en plusieurs étapes, parmi lesquelles la prolifération des cellules souches, la sélection d'une lignée, la migration des cellules de cette lignée, et leur différenciation. Une augmentation de la prolifération des cellules souches peut entraîner la multiplication de nouveaux neurones, mais la survie et le rythme de différenciation des cellules filles sont constants, au contraire, quand l'un des paramètres diminue tandis que l'autre



3. Le **DÉVELOPPEMENT DES CELLULES GRANULAIRES** dans un embryon semble se dérouler selon les étapes indiquées en vert. Une cellule souche pluripotente, c'est-à-dire capable d'engendrer presque tous les types de cellules de l'organisme, a des descendantes directes qui ne sont pas encore différenciées, mais qui sont destinées à devenir des cellules cérébrales (1). Ces cellules produisent ensuite des cellules qui se différencieront spécifiquement en neurones (2) ou en cellules gliales, lesquelles assurent la survie des neurones. Enfin, ces cellules se différencient en cellules granulaires dans l'hippocampe (3) ou en d'autres sortes de neurones. Les étapes 2 et 3 semblent se produire tout au long de la vie dans l'hippocampe humain.



augmenté, le nombre de neurones risque de ne pas varier. De nouveaux neurones se forment quand la survie et la différenciation s'accroissent, même si la prolifération reste stable.

Parmi les substances ou stimulus qui agissent sur la neurogenèse, certains semblent inhibiteurs. Ainsi, l'activation quotidienne du gyrus denté ralentit la production des neurones. Plus précisément, les neurotransmetteurs qui activent les cellules granulaires empêchent la prolifération des cellules souches dans l'hippocampe. Des concentrations élevées en hormone glucocorticoïdes dans le sang bloquent aussi la neurogenèse chez l'adulte.

Ces observations expliquent peut-être pourquoi le stress inhibe la prolifération des cellules souches dans l'hippocampe : au cours d'un stress, des neurotransmetteurs excitateurs sont libérés dans le cerveau, et des hormones glucocorticoïdes le sont, dans le sang, par les glandes surrénales. Ces découvertes sont importantes, parce qu'elles montrent des moyens d'agir sur la neurogenèse, mais, si des concentrations élevées en neurotransmetteurs excitateurs et en hormones glucocorticoïdes s'opposent à la neurogenèse, des concentrations faibles ne la favorisent peut-être pas.

Quels facteurs favorisent la neurogenèse dans l'hippocampe? Même dans des conditions qui ne sont pas particulièrement favorables, les tâches d'apprentissage améliorent la survie des

cellules endommagées par division des cellules souches, de sorte que le nombre de nouveaux neurones augmente. La neurogenèse résulte-t-elle d'une division accrue des cellules souches ou d'une augmentation de leur stabilité?

Pour le savoir, nous avons comparé la neurogenèse dans deux groupes de souris élevées dans des cages normales ou dans des cages équipées d'une roue. Nous avons alors constaté que les souris qui avaient accès à une roue avaient progressivement jusqu'à deux fois plus de nouveaux neurones que les autres, comme les souris placées dans un environnement amélioré. Toutefois, dans le cas des souris qui utilisaient les roues, l'augmentation du nombre de neurones matures résultait d'une division plus rapide des cellules souches, tandis que, dans le cas des souris placées dans un environnement amélioré, c'est l'augmentation de la proportion des descendantes des cellules souches qui survivent qui semble responsable du plus grand nombre de neurones. Ce résultat souligne une fois encore que la neurogenèse chez l'adulte résulte de plusieurs mécanismes complexes.

Quelles sont les molécules qui règlent la neurogenèse? Nous avons testé les facteurs de croissance de l'épiderme et du fibroblaste, qui, malgré leur nom, agissent aussi sur le développement des cellules nerveuses en culture. Ces substances ont été introduites dans les ventricules latéraux de rats adultes, où elles ont fait pro-

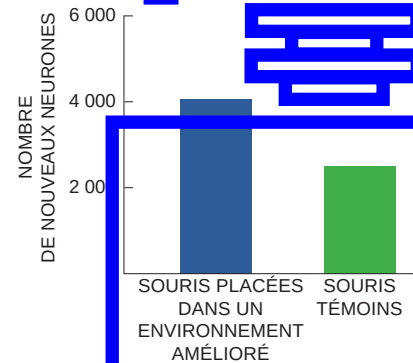
liférer des cellules souches. Le facteur de croissance de l'épiderme a favorisé la différenciation des cellules souches en cellules gliales dans le bulbe olfactif; le facteur de croissance du fibroblaste, lui, favorisait la production de neurones.

Par ailleurs, on a observé que les crises d'épilepsie ou les accidents vasculaires cérébraux (provoqués chez des animaux adultes) déclenchent une division spectaculaire des cellules souches, et même une neurogenèse. On ignore si le cerveau réagit ainsi pour remplacer les neurones détruits, mais, dans le cas des crises d'épilepsie, les connexions aberrantes établies par les nouveaux neurones risquent de favoriser la survenue de nouvelles crises. La division des cellules souches et la neurogenèse sont des preuves supplémentaires de la capacité d'autoréparation du cerveau. Reste une question lancinante : pourquoi cette capacité n'est-elle pas davantage exploitée?

Dans les expériences exposées, nous avons observé la neurogenèse chez des animaux génétiquement identiques, mais placés dans des conditions différentes. On peut aussi maintenir l'en-

vironnement constant et comparer les gènes de lignées d'animaux dont la neurogenèse diffère de façon innée, notamment les gènes activés dans les régions du cerveau où siège une neurogenèse.

Les gènes commandent la synthèse des protéines qui, à leur tour, assurent l'ensemble des activités cellulaires et, par exemple, le déclenchement de la



4. UN ENVIRONNEMENT AMÉLIORÉ (à l'extrême gauche) favorise mieux qu'une petite greffe de cellules souches la neurogenèse dans le gyrus denté de l'hippocampe. Certains neurobiologistes cherchent quelles caractéristiques de l'environnement ont le plus d'effets sur la neurogenèse. La comparaison de la neurogenèse chez des souris élevées dans des cages normales et dans des cages pourvues d'une roue montre que l'utilisation intensive d'une roue favoriserait la neurogenèse (ci-dessus).

division des cellules, leur migration ou leur différenciation. Si l'on parvenait à isoler les gènes qui participent à la production de neurones, on pourrait identifier les protéines associées et préciser la contribution respective des gènes et des protéines à la neurogenèse.

La réparation du cerveau

Les neurobiologistes finiront peut-être par décoder la cascade des réactions qui, après un stimulus particulier – telles qu'une modification de l'environnement ou une réaction physiologique – aboutissent à l'augmentation ou à la diminution de cette activité génique et par conséquent, de la neurogenèse. Ils disposeront alors des informations nécessaires au déclenchement de la régénération neuronale. On pourrait, par exemple, administrer des molécules régulatrices, introduire des gènes par thérapie génique pour que les molécules utiles soient produites directement dans l'organisme, transplanter des cellules souches, moduler les stimulus environnementaux ou cognitifs, modifier l'activité physique ou encore combiner ces différents facteurs.

Avant d'atteindre ces objectifs, des décennies d'études continues s'imposeront, mais l'enjeu est considérable : nous avons la perspective de réparer des aires cérébrales où l'on sait que la neurogenèse a lieu et des aires où des cellules souches existent, mais ne se divisent pas. On envisage ainsi de

stimuler la migration des cellules souches vers des aires inhabituelles et leur différenciation en tel ou tel type de cellule nerveuses. Les nouvelles cellules ne reconstruiront pas des zones entières du cerveau et ne restitueront pas la mémoire perdue, mais elles pourront, par exemple, fabriquer de la dopamine (la diminution de ce neurotransmetteur est responsable de la maladie de Parkinson).

Des recherches menées dans d'autres domaines pourraient également améliorer les traitements. Ainsi, on sait désormais cultiver des cellules souches d'embryon humain, qui peuvent se différencier en n'importe quel type de cellules de l'organisme – ou presque. Un jour, peut-être saura-t-on déclencher à volonté la différenciation de ces cellules souches embryonnaires en un type particulier de neurones. Transplantés dans la zone endommagée du cerveau, ces neurones remplaceront les cellules détruites.

Fred GAGE est professeur de neurosciences à l'institut Salk de La Jolla. Gerd KEMPERMANN, qui a travaillé dans le laboratoire de F. Gage pendant trois ans, est maintenant à l'Université de Bonn.

Gerd KEMPERMANN, H. Georg KUHN et Fred H. GAGE, *More Hippocampal Neurons in Adult Mice Living in an Enriched Environment*, in *Nature*, vol. 386, pp. 493-495, 3 avril 1997.

Peter S. ERIKSSON et al., *Neurogenesis*

Toutefois, les greffes risquent d'être rejetées par le système immunitaire du receveur. Pour vaincre cette difficulté, on pourrait prélever des cellules souches dans le cerveau des personnes malades et les modifier, plutôt que d'utiliser des cellules souches d'un donneur. On dispose déjà de moyens relativement peu invasifs pour prélever des neurones chez des malades.

Malheureusement de telles applications médicales sont encore fort éloignées. Pour, il faudra passer de l'étude des rongeurs à celle des êtres humains et l'on devra alors utiliser des méthodes très élaborées, à l'instar des techniques d'imagerie non invasives (l'imagerie par résonance magnétique ou la tomographie par émission de positons, par exemple). Nous devons également nous assurer que les neurones dont on aurait stimulé la croissance dans le cerveau (ou qui auraient été transplantés) rempliront bien le rôle qui leur serait assigné, et celui-là seulement.

in the Adult Human Hippocampus, in *Nature Medicine*, vol. 4, n° 11, pp. 1313-1317, novembre 1998.

Elizabeth GOULD et al., *Learning Enhances Adult Neurogenesis in the Hippocampal Formation*, in *Nature Neuroscience*, vol. 2, n° 3, pp. 260-265, mars 1999.

Henriette VAN PRAAG et al., *Running Increases Cell Proliferation and Neurogenesis in the Adult Mouse Dentate Gyrus*, in *Nature Neuroscience*, vol. 2, n° 3, pp. 266-270, mars 1999.

Tremblements de terre et archéologie

HERVÉ PHILIP • ARKADI KARAKHANIAN

La sismologie rencontre l'histoire : lors des recherches sur les séismes anciens, les géologues ont découvert la ville de Behoura, en Arménie, et retracé comment Arghishti I^{er}, roi d'Ourartou, l'avait conquise huit siècles avant notre ère.

1. SUR CETTE PHOTOGRAPHIE aérienne on distingue une partie de la cité antique découverte au Sud-Est du lac Sévan, au voisinage de la faille de Pambak-Sévan-Sunik, d'où a été prise la photographie. On voit (à gauche) des murs dessinant des fonds d'habitations et des enceintes de pierres dressées. La longueur d'un côté de la ville est de l'ordre du kilomètre. Les géologues ont creusé des tranchées perpendiculairement au tracé de la faille (F), qui recoupe l'escarpement de faille (a), haut de deux mètres environ, pour en étudier l'histoire et la dater. Le passage de la faille dans la tranchée est souligné par le changement de teinte des déblais entre les calcaires crétacés du substratum (en clair) et les sédiments déposés en pied d'escarpement (en sombre). La datation des différents niveaux et l'amplitude des déplacements sur les failles permettent d'estimer la périodicité et l'importance des séismes.

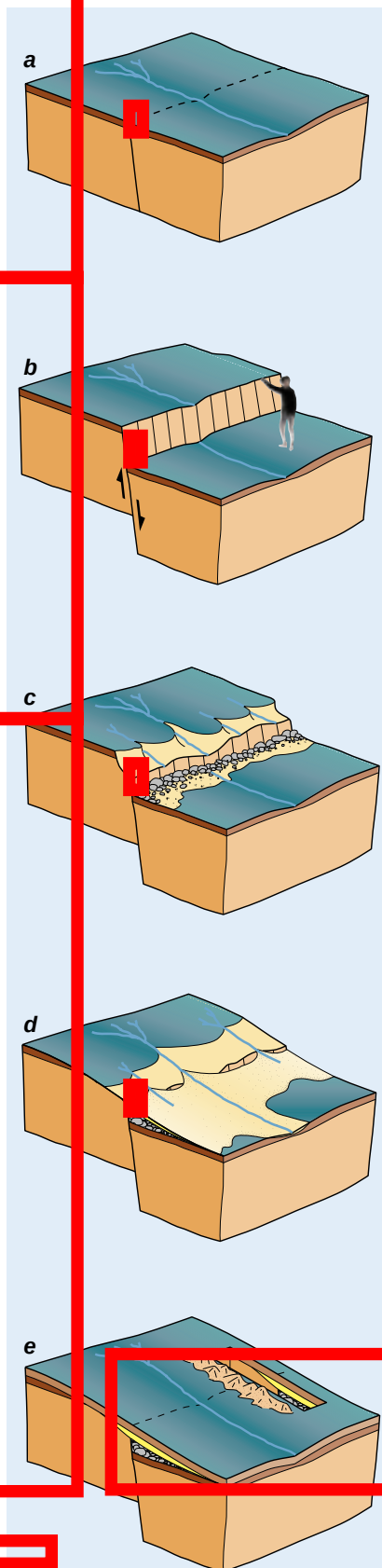


Au cours du temps, le déplacement des plaques entraîne une accumulation de contraintes dans les roches et sur les failles. Quand la limite de rupture est atteinte, les deux compartiments de la faille coulisent brutalement l'un par rapport à l'autre et un séisme se produit ; chaque séisme « remet les compteurs de contraintes à zéro ». Ensuite, les contraintes recommencent à s'accumuler pour un nouveau cycle sismique. La datation des séismes passés permet d'évaluer le temps d'accumulation des contraintes (temps de récurrence) : aussi les géologues déterminent-ils l'activité sismique passée d'une région pour évaluer le risque sismique actuel.

Souvent, la période couverte par les informations fournies par les réseaux sismologiques (quelques décennies) ou par la documentation historique (quelques siècles dans la plupart des pays) n'est pas suffisante pour que les géologues déterminent la période de retour de forts séismes. Cette période peut dépasser quelques siècles aux zones frontalières entre les plaques, et plusieurs millénaires dans les régions à l'intérieur des continents. Aussi, géologues et sismologues des zones continentales s'intéressent à des périodes de temps allant bien au-delà de la période historique.

La paléosismologie, l'étude des séismes anciens, s'intéresse aux déformations et aux perturbations que les séismes de forte magnitude produisent et ont produit par le passé sur les formations géologiques superficielles (alluvions, colluvions, sols...). Ces déformations résultent de l'arrivée de la rupture sismique en surface le long de la faille responsable du séisme (effets directs), et des mouvements vibratoires du sol : éboulements de falaise, glissements de terrain, liquéfaction de sol, chutes de stalactites dans les grottes (effets dits indirects). Ces perturbations caractéristiques des séismes peuvent être fossilisées, et donc préservées, par des dépôts postérieurs ou par la formation d'un sol.

Le paléosismologue repère, dans un premier temps, les sites favorables, c'est-à-dire susceptibles d'avoir enregistré, dans les niveaux sédimentaires superficiels, les effets des séismes anciens ; pour accéder à ces informations, il creuse des tranchées. (On réserve le terme d'archéosismologie à l'étude des séismes anciens affectant



2. ÉVOLUTION D'UN ESCARPEMENT de faille créé lors d'un séisme (b). L'escarpement est progressivement nivelé par l'érosion (c et d). Le paléosismologue creuse une tranchée (e) pour étudier les sédiments issus de l'érosion du compartiment soulevé.

des sites archéologiques, étude où archéologues et géologues coopèrent.)

La plupart des études paléosismologiques sont réalisées sur la trace de la faille active ou dans son environnement immédiat ; les failles actives sont facilement repérables dans la topographie par les anomalies morphologiques que leurs fonctionnements successifs produisent : rivières et ruisseaux décalés ou barrés, reliefs déplacés, etc.

Lorsqu'un séisme dépasse la magnitude 6,5 - dans les continents, la rupture sismique arrive jusqu'en surface et forme un ressaut topographique (escarpement de faille), particulièrement net lorsque les formations géologiques en surface sont dures ; le ressaut topographique peut alors atteindre plusieurs mètres de haut.

Évolution de l'escarpement

Cet escarpement va être soumis à l'érosion et il s'érodera plus ou moins rapidement en fonction de l'agressivité du climat. La dégradation de l'escarpement par l'érosion commence, immédiatement après le séisme, par l'éboulement de blocs composés d'éléments de roche qui s'accumulent au pied de l'escarpement. Ensuite, des dépôts plus fins, amenés par le ruissellement, recouvrent peu à peu les dépôts de blocs et finissent, sinon par niveler l'escarpement, du moins par en atténuer la pente.

L'ensemble des sédiments grossiers et des sédiments fins qui les surmontent constitue le coin « colluvial », la traduction sédimentaire d'un séisme. Quand l'escarpement n'est pas remobilisé rapidement par un nouveau fonctionnement de la faille, les effets de l'érosion se poursuivent ; ils s'atténuent progressivement jusqu'à ce que l'escarpement atteigne un profil d'équilibre ; il est enfin fossilisé par un sol qui s'installe, quand le climat le permet. Si la faille est réactivée, un nouveau cycle commence et un deuxième coin colluvial se superpose au premier. Le volume d'un coin colluvial est fonction de la hauteur de l'escarpement, et donc de la taille du séisme. La mesure de cette taille constitue une évaluation de l'importance d'un séisme passé.

Le paléosismologue effectue une grande partie de ses observations sur les parois des tranchées qu'il creuse perpendiculairement à l'escarpement ; il en établit un relevé, identifiant chaque niveau stratigraphique et notant la présence ou non

de déformations d'origine sismique. Lorsque le travail très minutieux, comparable à celui effectué lors d'une fouille archéologique, est terminé, il faut interpréter la coupe obtenue et identifier, d'après la nature et la disposition géométrique des différents niveaux, les événements sismiques ainsi mis en évidence. Après avoir identifié ainsi un ou plusieurs séismes, la question immédiate est la datation des événements sismiques.

L'interprétation et la datation des séismes

La présence de sol, et donc de matière organique, offre, dans certains cas, la possibilité de dater par la méthode carbone 14, utilisable jusqu'à 35-40 000 ans. Il existe bien sûr d'autres méthodes de datation utiles lorsqu'il n'y a pas de matière organique dans les dépôts (climat aride, par exemple) ou que l'on aborde des périodes de temps plus

anciennes que 40 000 ans. Ces méthodes sont toutes relativement récentes et souvent très délicates d'utilisation (U-Th, TL, OSL, ^{10}Be - Al^{26} ...). En datant plusieurs niveaux, le géologue détermine les dates des différents séismes.

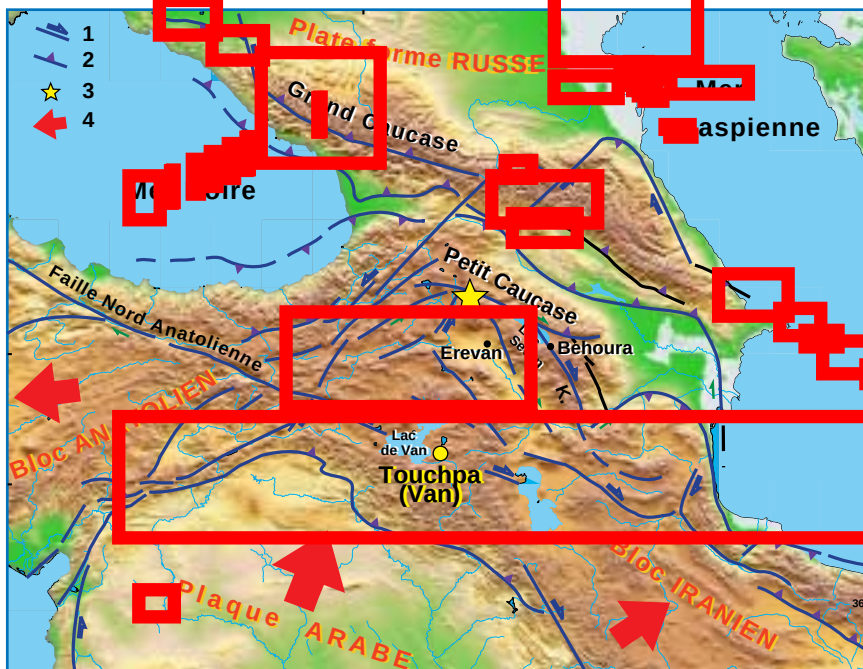
Quand la faille passe à proximité d'un site archéologique, on peut être avoir la chance d'accéder à des éléments complémentaires. Ceux-ci permettent de dater certains niveaux, par des fragments de céramique par exemple, et donc de dater des séismes qui se seraient produits lors de l'occupation du site.

Nous verrons qu'en Arménie, nous avons été heureux : non seulement nous avons trouvé sur nos sites de tranchées des vestiges d'occupation humaine de l'Âge du bronze, mais nous avons pu préciser la date d'un événement sismique grâce à la découverte d'une cité ancienne et à la relecture d'un récit de bataille gravé sur une pierre située sur les rives du lac de Van.

La question des séismes anciens rassemble ainsi des spécialistes qui, *a priori*, ne devaient pas se rencontrer : préhistoriens, sismologues, pédologues, historiens, paléographes, géologues, géomorphologues, etc.



3. ESCARPMENT DE LA faille associée au séisme de Spitak (Arménie), en décembre 1988, quelques jours après le séisme. On voit la traversée des formations volcaniques consolidées du début du Tertiaire, qui donnent à l'escarpement son aspect de « mur ».



4. CARTE TECTONIQUE des régions du Caucase où sont représentées les principales failles actives de la région. 1. principaux décrochements, 2. failles inverses, 3. épïcentre du séisme de Spitak, 4. mouvements relatifs du Bloc arabe, de l'Anatolie et du Bloc iranien par rapport à l'Eurasie au Nord. La vitesse de convergence entre le Bloc arabe et l'Eurasie est d'environ 25 millimètres par an.

Les séismes en Arménie

Le séisme de Spitak, en Arménie, qui s'est produit le 7 décembre 1988, est le plus meurtrier qu'aient connu les régions transcaucasiennes depuis plusieurs siècles ; mais l'histoire de l'Arménie montre que ce pays, qui s'étendait autrefois bien au-delà de ses frontières actuelles, avait subi par le passé les effets de séismes tout aussi destructeurs que celui de Spitak.

Ainsi, Dvin, l'ancienne capitale de l'Arménie, a-t-elle été abandonnée après avoir été détruite à plusieurs reprises. Une autre ancienne capitale, Ani, aujourd'hui en territoire turc, subissait un siège (au XI^e siècle) depuis de longs mois lorsque se produisit un fort séisme qui détruisit ses fortifications, facilitant ainsi sa prise par les armées d'assiégeants.

Les nombreuses églises d'Arménie sont autant de témoins de ces séismes du passé : églises détruites, puis reconstruites, endommagées à nouveau et réparées, etc. ; les exemples sont nombreux, et l'identification et la datation de ces dégâts sur l'architecture monumentale ont contribué à la connaissance des séismes du passé récent de l'Arménie. L'étude du séisme de Spitak par

des équipes franco-arméniennes en 1988-1989, a été le point de départ d'une collaboration scientifique dans le domaine de la sismotectonique (Programme international de coopération scientifique du CNRS-Ministère des Affaires étrangères).

En Arménie, nombreuses sont les failles actives pouvant engendrer des séismes destructeurs. Leur identification et leur potentialité sismique constituent une donnée importante à prendre en compte pour ce pays en pleine reconstruction économique et énergétique (centrale nucléaire).

La faille historique de Pambak-Sevan-Sunik

Ces trois dernières années, notre intérêt s'est porté sur l'une des failles les plus importantes d'Arménie : la faille de Pambak-Sevan-Sunik. Cette faille, qui s'étend de la région de Spitak, au Nord-Ouest, jusqu'en Iran, au Sud-Est, sur plus de 400 kilomètres de long, n'a pas produit des séismes importants (de magnitude supérieure à 7) pendant la période historique, alors qu'elle présente tous les indices morphologiques d'une faille active décrochante dextre dans l'Holocène (il y a moins de 10 000 ans). Ce « silence » ne serait-il pas annonciateur de la préparation d'un prochain séisme important ?

Après des études préparatoires (images SPOT, photos aériennes, relevés morphologiques et géométriques sur le terrain...), nous avons sélectionné des sites qui nous paraissent réunir des conditions favorables pour identifier les traces de séismes anciens. Au cours de cette phase préparatoire, nous avons compris les conditions exceptionnelles

dans lesquelles nous nous trouvons pour des études paléosismologiques : nous avons eu le bonheur de découvrir des sites archéologiques anciens (Âge du bronze) situés sur le passage même de la faille active.

La cité perdue

C'est ainsi que, dans la région de Khonarasar, au Sud-Est du lac Sévan, nous avons découvert une ville antique, avec habitations, fortifications, nécropole. À chaque instant de notre exploration, nous mesurons l'intérêt de notre découverte : une Pompéi de l'Âge du bronze ! Malgré son étendue (environ un kilomètre carré) et le bon état de conservation des constructions, elle était totalement inconnue des archéologues ! Des fragments de céramique nous indiquent que cette cité avait été occupée jusqu'au I^{er} millénaire avant J.-C.

En suivant les traces de la faille sur le segment de Khonarasar, nous avons vu un mur megalithique décalé horizontalement de près de deux mètres par la faille. Nous avions là un indice exceptionnel de son activité la plus récente, il y a 500, 1 000, 2 000 ans ou plus ? L'histoire ancienne et la paléogéographie viennent à notre secours et précisent la date du séisme responsable du décalage du mur.

Au début du siècle dernier, près de la ville de Van, en Anatolie orientale, les archéologues ont découvert, sur une paroi rocheuse, une inscription en caractères cunéiformes, divisée en bandes, dont sept sont bien conservées. C'est la plus longue inscription cunéiforme ourartienne connue (manuscrit de Khor-khor du roi Arghishti I^{er}). Le royaume d'Ourartou (IX-IV^e siècle avant J.-C.)

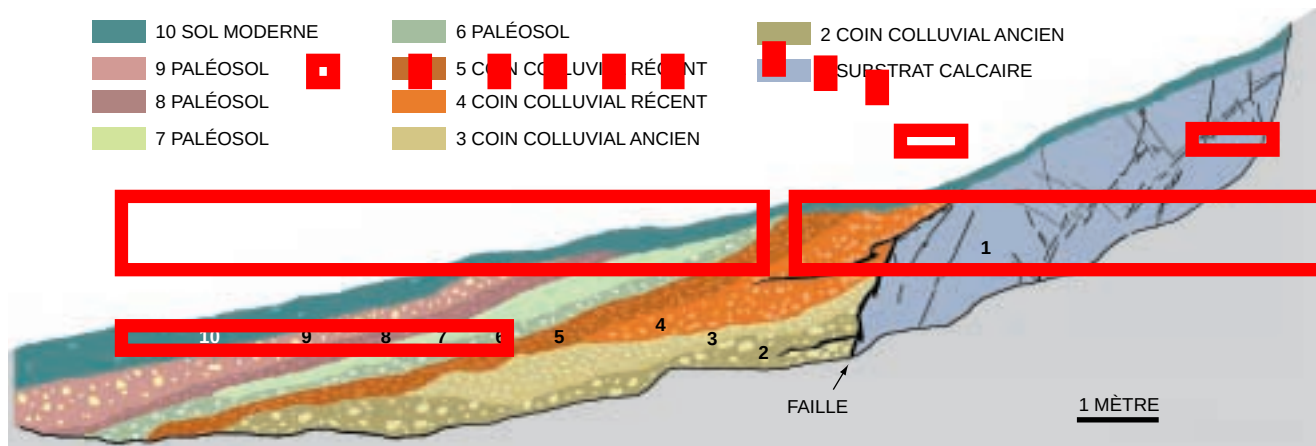
avait pour capitale Touchpa, sur les rives du lac de Van, site de l'actuelle ville de Van. Le texte a été gravé entre 742 et 739 avant J.-C. et sa première description a été établie par Schultz en 1828.

L'inscription nous apprend que le roi Arghishti I^{er}, fondateur de la forteresse d'Érévan (Erébouni), entreprit une campagne militaire aux frontières Nord du royaume, dans la région du lac Sévan entre 782 et 773 avant J.-C. Le roi dut assiéger la ville de Behoura, au pied des montagnes de Bamni (massif volcanique de Vardénis).

L'emplacement de cette cité pré-ourartienne était inconnu. À la suite de notre découverte, nous n'avons pas hésité à faire le parallèle entre la ville de Behoura et les vestiges que nous venions de découvrir.

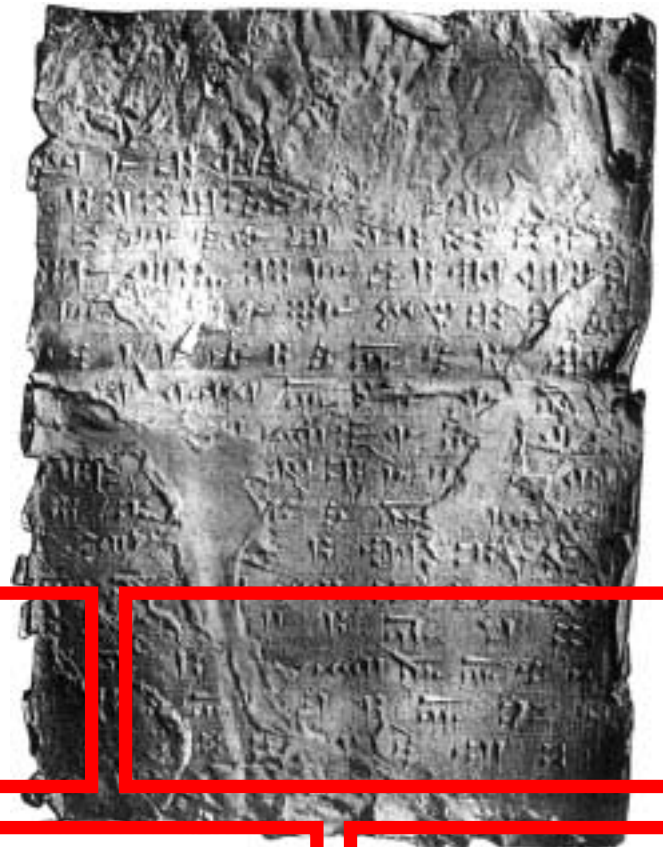
Le texte cunéiforme présente un grand intérêt sismotectonique car il évoque les conditions dans lesquelles la ville fut prise par le roi Arghishti I^{er}. « Par la grandeur de Khaldi [Dieu majeur ourartien], Arghishti I^{er} dit : « Quand j'ai encerclé la ville de Behoura une nouvelle fois, les montagnes de Bamni [massif de Vardénis] étaient dévastées, la fumée [cendres ?] recouvrait la ville et atteignaient le Soleil. Au moment où les montagnes de Bamni étaient dévastées, j'ai pris la ville de Behoura. »

Dans un autre passage faisant allusion aux mêmes faits, c'est le fils d'Arghishti, Sardour II, qui parle : « Le premier jour, j'ai craint mes armes, j'ai fui dans les montagnes d'Ushkiani et de Bamni, j'en ai encerclé une partie que j'ai tuée, les autres qui se sont échappés ont été brûlés par le dieu Taisheba [Dieu tellurique]. »



5. RELEVÉ D'UNE TRANCHEE indiquant les différents niveaux sédimentaires qui se sont déposés dans le compartiment abaissé à gauche. Ces dépôts et l'érosion dans le compartiment surélevé ont nivelé l'es-

carpement de faille. On note la présence de deux coins colluviaux (niveaux 2-3 et 4-5) qui indiquent ici que deux séismes se sont produits avant le dépôt du niveau 6.



6. TÉMOIGNAGES ARCHÉOLOGIQUES : à gauche, fragments de poteries découverts dans les niveaux à la base de la tranchée (niveau IV). Les archéologues arméniens attribuent ces poteries à la période Kura-Arax (Âge du bronze, il y a 4200-4000 ans). À droite, texte cunéiforme ourartien gravé sur une paroi rocheuse sur les rives du lac de Van, entre 742 et 739 avant J.-C. Ce manuscrit relate les campagnes militaires du roi Arghishti Ier dans la région du lac Sévan et de la grande vallée d'Arax [Beylagou, Ourartien],

Arghishti Ier dit : Quand j'ai encerclé la ville de Behoura une nouvelle fois, les montagnes de Bamni [massif de Vardenis] étaient dévastées, la fumée [cendres ?] recouvrait la ville et atteignaient le Soleil.» Dans un autre passage faisant allusion aux mêmes faits, c'est le fils d'Arghishti, Sardour II, qui parle «le peuple [de Behoura] craignant mes armes s'échappa et partit dans les montagnes d'Ushkiani et de Bamni, j'en ai encerclé une partie que j'ai tuée, les autres qui se sont échappés ont été brûlés par le dieu Taisheba [Dieu tellurique].

Ces deux passages du texte font allusion de façon évidente à des phénomènes géologiques catastrophiques : volcan, séisme (?) qui seraient venus prêter main forte aux envahisseurs ourartiens pour conquérir la place forte de Behoura.

Ces allusions semblent plausibles lorsque l'on sait qu'à moins de 15 kilomètres du site de la ville subsistent des évidences d'activités volcano-tectoniques parmi les plus récentes d'Arménie. En effet, au pied du volcan Porak, des coulées volcaniques très fraîches (peu colonisées par la végétation) sont dans le prolongement Sud-Est du segment de faille de Khonarasar. Dans cette région, comme dans d'autres secteurs d'Arménie, l'activité volcanique holocène (moins de 10 000 ans) est liée au fonctionnement de failles dont certaines peuvent recouper et décaler des cônes et des coulées volcaniques.

Restait à vérifier si nos déductions historiques étaient compatibles avec celles déduites des observations géo-

logiques réalisées sur la faille elle-même. Pour cela, nous avons creusé des tranchées sur le passage de la faille et, dans l'une d'entre elles, nous avons découvert un sol ancien contenant des fragments de céramique du 1^{er} millénaire avant J.-C., identiques à celles découvertes près du mur mégalithique. Ce sol ancien est clairement recoupé par une faille, le tout étant cacheté par le sol moderne. La faille recoupant le sol ancien représente, comme pour le mur mégalithique décalé, le dernier événement sismique, et son âge est compatible avec la date (entre 783 et 773 avant J.-C.) de la prise de Behoura par le roi Arghishti I^{er}.

Paradoxalement, l'histoire géologique récente, et plus particulièrement celle des catastrophes naturelles, est souvent mal documentée. Les avancées dans ce domaine résultent de la mise au point de méthodes modernes comme la télédétection ou des datations fiables pour les périodes récentes, mais surtout par une collaboration

interdisciplinaire ; à ce titre, notre expérience en Arménie est exemplaire. Cette rencontre entre l'Histoire ancienne et la Géologie des tremblements de terre a quelque chose d'émouvant, pour nous géologues, peu habitués à mettre en scène des témoins humains d'événements tectoniques du passé dont les noms sont maintenant presque oubliés.

Hervé PHILIP est maître de conférences à l'Université de Montpellier II. Arkadi KARACHANIAN est chercheur à l'Institut géologique de l'Académie des sciences de la République d'Arménie, directeur du Laboratoire Georisk.

RES. PLATS, K. SIEH, et C.R. ALLEN, *The Geology of Earthquakes*, Oxford University Press, 1997.

Mac CALPIN, *Paleosismology*, Academic Press, 1996.

Trésors de l'Arménie ancienne, des origines au IV^e siècle, Somogy Édition d'Art, Musée d'Obrée (Nantes), Catalogue de l'exposition, mars-septembre 1996.

La datation des objets en bois

GOTTFRIED MATTHIAS

Une nouvelle méthode, simple, bon marché et fiable permet de déterminer l'âge de meubles, de panneaux peints, de sculptures et autres objets en bois.

La matière est le support qui enregistre l'âme de l'artiste, peintre, ébéniste ou sculpteur, et accompagne toute la vie de l'œuvre : pour en déterminer l'authenticité, on doit l'analyser. Lorsque les critiques d'art et les collectionneurs veulent s'assurer de la date de création d'une œuvre d'art, ils comparent les formes, les couleurs et le style à ceux d'autres œuvres d'art datées de façon fiable et accréditent leur opinion par des études d'histoire de l'art, concentrant leur attention sur des aspects esthétiques.

Focalisée non sur le message, mais sur le support, une nouvelle technique qui enregistre l'absorption des rayonnements infrarouges par le bois augmente la fiabilité de la datation.

Les librairies et les bibliothèques proposent une profusion de livres d'art en toutes langues, qui détaillent les caractéristiques de l'art de chaque époque ; malheureusement, ces livres sont à la disposition des faussaires. L'imitateur qui copie la peinture gothique se documente sur les techniques et les styles de l'époque ; paradoxalement, il a plus d'information que l'artiste ou l'artisan médiéval...

Le but principal du faussaire est de tromper l'œil humain, et il peut induire en erreur les experts les plus habiles. En revanche, une simple loupe suffit à révéler les détails de matière, de patine, de couleurs et d'usure, dont la réalisation demanderait au faussaire un travail excessivement coûteux, l'exposant d'avantage au risque d'être démasqué. Si l'analyse de la matière d'une œuvre d'art détermine la plupart des faux, elle n'est pas absolument sûre, et doit être complétée par une datation scientifique certaine.

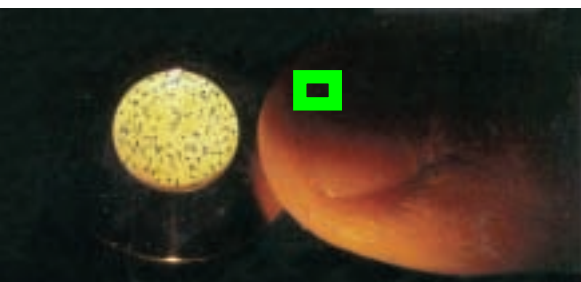
Jusqu'en 1992, la datation des œuvres d'art était insuffisamment fiable. La méthode reposant sur le dosage de l'isotope radioactif du carbone, le carbone 14, n'est pas applicable aux objets fabriqués après 1650 environ, à cause des changements qui ont eu lieu dans les couches supérieures de l'atmosphère terrestre, où cet isotope est produit. La concentration en carbone 14 par rapport aux produits de sa désintégration n'est plus une mesure fiable du temps passé.

Une autre technique scientifique de datation, la dendrochronologie (fondée sur la mesure des distances entre les cernes de croissance du bois) ne s'est pas toujours révélée utile en raison de l'effet sur la croissance des précipitations et autres facteurs climatiques locaux. De surcroît, important handicap, les cernes ne peuvent être étudiés que sur une surface relativement grande. Aussi 90 pour cent des créations artistiques ou artisanales en bois ne peuvent être datées scientifiquement.

1. POUR DATER ET AUTHENTIFIER une statuette, on prépare une «pastille» contenant une petite quantité de sciure de bois prélevée sur l'œuvre d'art, et on la mélange à une matrice transparente aux rayonnements infrarouges. Par la datation infrarouge, on a déterminé que le bois de cette statuette est ancien ; la facture est caractéristique de l'époque médiévale. En combinant la datation spectroscopique et les opinions d'experts sur le style, on s'assure de l'authenticité des objets en bois.



Photographies : Museo del Collezionista d'Arte/Dall'Oglio/Archivio I.G.D.A.



La Fondation Matthaes, propriétaire du *Museo del collezionista d'arte*, à Milan, et de son laboratoire, lança en 1989 une recherche sur la datation des objets d'art en bois fabriqués après la période gréco-romaine.

La recherche a porté sur l'analyse chimique des changements du bois au cours du temps. Ces tests sont trop coûteux pour être utilisés de façon systématique, mais la situation a changé radicalement avec les possibilités offertes par la spectroscopie infrarouge. Les données spectroscopiques sont rapidement analysées, comparées et classées par les ordinateurs.

La spectroscopie infrarouge est utilisée depuis des décennies par l'industrie pour des analyses chimiques, des tests de routine de pollution de l'air et de l'eau, et pour des analyses médicales. Les entreprises pharmaceutiques contrôlent constamment la qualité des principes actifs qu'elles produisent. La surveillance de la production au moyen de la spectroscopie assure ce contrôle rapide et continu : on compare le produit avec un échantillon de référence de paramètres connus.

Le vieillissement modifie le spectre

En revanche, l'application (brevetée en Italie par l'auteur de cet article) de la spectroscopie à la datation du bois est nouvelle. Cette méthode, mise au point au *Museo del collezionista d'arte*, est extrêmement utile : les experts estiment que plus de 60 pour cent des antiquités du marché de l'art sont des faux.

Cette nouvelle méthode de datation est fondée sur la transformation du bois avec l'âge, laquelle se décèle à des modifications du spectre

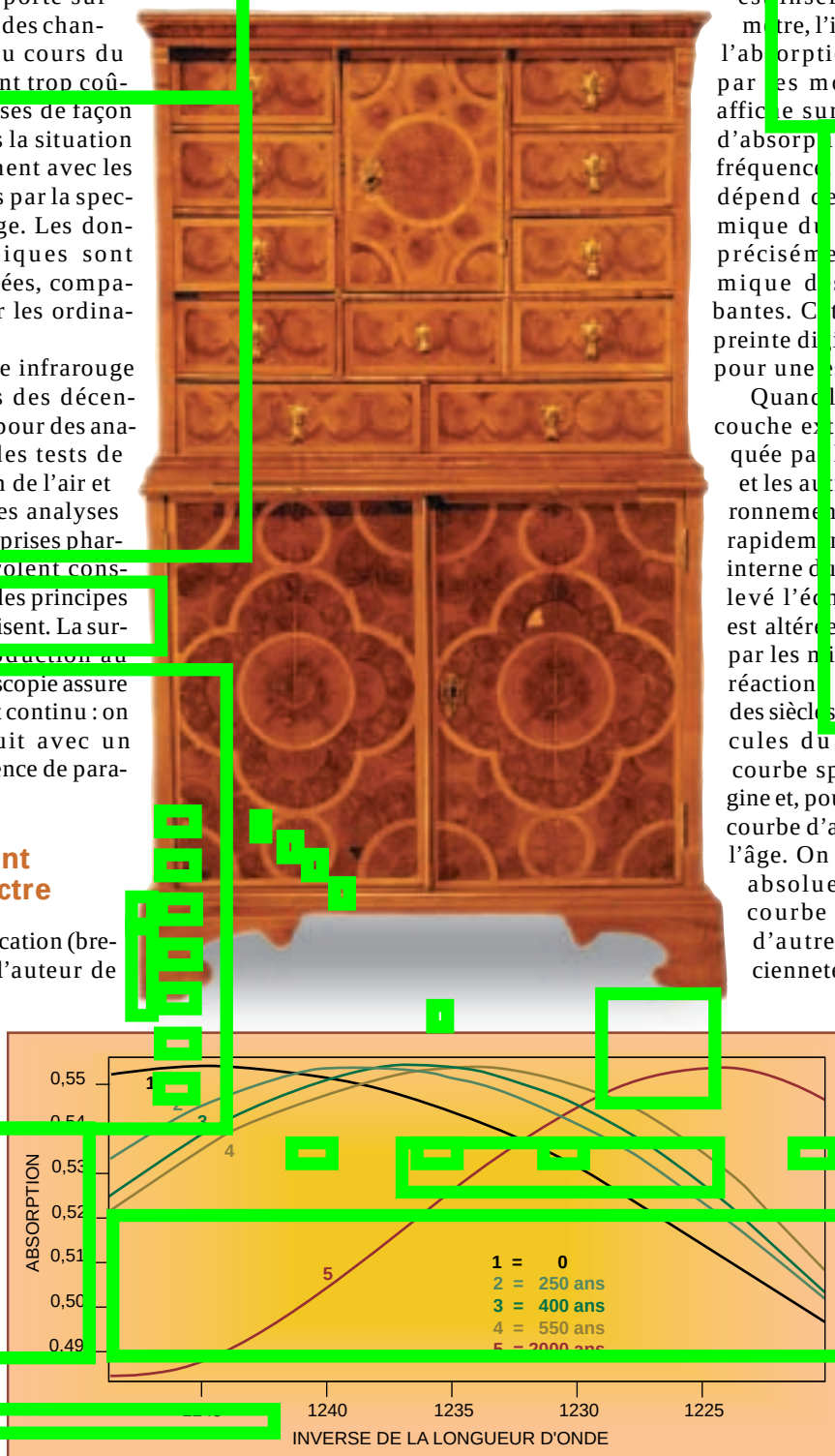
d'absorption infrarouge. Toutes les molécules organiques ont des liaisons qui vibrent à certaines fréquences, déterminées par leur type, par la nature des atomes liés et par l'environnement de ces atomes dans les molécules : lors-

qu'elles sont illuminées par des rayonnements d'une fréquence appropriée, les molécules absorbent ces rayonnements.

Quand une faible quantité de sciure d'un arbre fraîchement abattu est insérée dans le spectromètre, l'instrument enregistre l'absorption du rayonnement par les molécules du bois. Il affiche sur un écran la courbe d'absorption en fonction de la fréquence, créant une image qui dépend de la composition chimique du bois, sans identifier précisément la structure chimique des molécules absorbantes. Cette courbe est «l'empreinte digitale» d'un bois jeune pour une espèce d'arbre.

Quand le bois vieillit, la mince couche externe de l'objet (attaquée par la lumière, l'oxygène et les autres facteurs de l'environnement) se décompose assez rapidement, tandis que la masse interne du bois, où doit être prélevé l'échantillon à mesurer, est altérée bien plus lentement par les micro-organismes et les réactions chimiques. Au cours des siècles, l'altération des molécules du bois transforme la courbe spectroscopique d'origine et, pour chaque essence, une courbe d'absorption caractérise l'âge. On obtient une datation absolue en comparant la courbe obtenue avec celles d'autres échantillons d'ancienneté attestée.

Le bois étant un matériau complexe, on ne mesure l'absorption que par quelques composants pour lesquels les signes de vieillissement sont mesurables. On a identifié les composés végétaux qui subissent une transformation lente et constante et qui ne sont pas sensibles aux agents atmosphériques, aux variations de températures, aux attaques des champignons et d'autres micro-organismes.



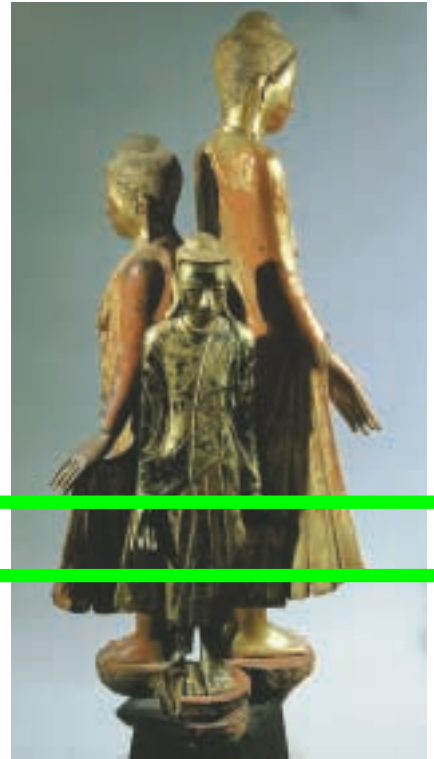
2. SPECTRES INFRAROUGES DE CHÊNES d'âges différents. Quand le bois vieillit, le pic de la courbe d'absorption se déplace vers les grandes longueurs d'onde. Avec les spectres établis pour chaque essence, on date avec précision les objets d'art en bois. Ainsi le meuble ci-dessus n'est pas authentique. La datation spectroscopique a révélé qu'en dépit des similitudes de style des parties hautes et basses, la portion supérieure date d'il y a 250 ans, tandis que la partie inférieure a été fabriquée au tout début du xx^e siècle.



3. LA PRÉSENCE D'UN CENTRE EN BOIS à l'intérieur de cette pagode chinoise en ivoire, a permis de la dater.



4. MASQUE AFRICAIN YORUBA (à gauche) et représentation du Bouddha (à droite) faites du même bois. La comparaison des œuvres non datées avec d'autres œuvres bien attestées provenant de régions de même climat tropical assure une bonne identification.



5. SCULPTURE CHINOISE (à gauche) et sculpture italienne de la même époque (à droite). Les deux structures sont en peuplier. L'utilisation de la datation par spectroscopie infrarouge sur ces deux

œuvres a confirmé que le vieillissement du bois présente les mêmes caractéristiques sur tous les continents, sauf dans les régions de climat tropical où un nouvel étalonnage est nécessaire.

L'existence de tels composés a été confirmée par l'analyse d'échantillons végétaux qui ont été exposés pendant de nombreux millénaires à l'air, la terre et l'eau. Les bateaux anciens conservés dans le sol humide, sont des exemples bien connus, tout comme l'ambre, une résine d'arbre fossile qui a survécu pendant plus de 100 millions d'années dans des environnements hostiles.

Une comparaison des spectres de l'ambre fossile de la Baltique et de la colophane ou du copal (des résines d'arbres actuels) montre que les premières modifications chimiques, quelques modifications chimiques. Comme de nombreux composés végé-

taux ne sont pas modifiés par les facteurs environnementaux, la datation spectroscopique infrarouge des objets anciens en bois est indépendante de leur état de conservation.

On pourrait craindre que le climat de la région où a poussé un certain arbre ait un effet sur les mesures spectroscopiques et, donc, sur la fiabilité de notre méthode de datation des objets en bois. Il n'en est rien : les spectres infrarouges bien choisis ne dépendent pas de la zone où l'arbre

croît. La datation spectroscopique, la Fondation Matthäus a établi avec certitude que le bois d'une même

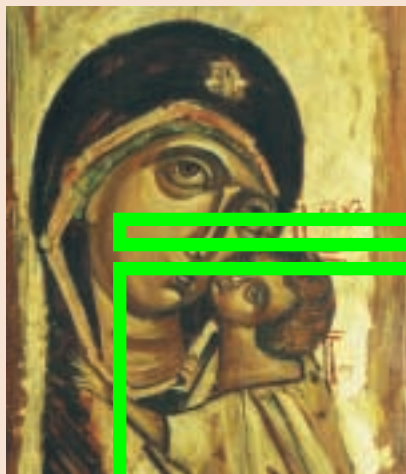
espèce subit le même processus de vieillissement sur tous les continents, sauf dans les régions à climat tropical. Pour les objets façonnés dans les régions tropicales (Afrique et Asie du Sud-Est principalement), des corrections s'imposent.

D'autres facteurs que le vieillissement naturel du bois perturbent-ils la datation spectroscopique? Par exemple, la composition chimique du bois est-elle modifiée par les vers, qui consomment principalement certaines

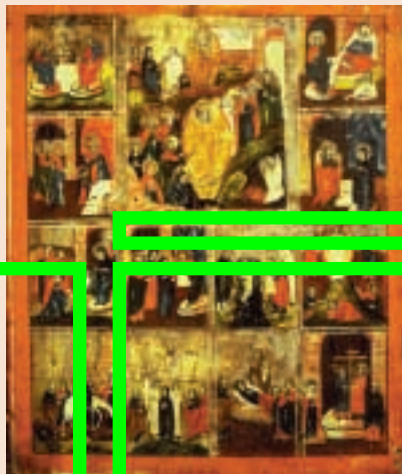
parties du bois? Les modifications de la composition chimique du bois causées par la présence de vers, et un nettoyage effectué au laboratoire

Les icônes sont contrefaites

La datation du bois par spectroscopie infrarouge est particulièrement probante pour les panneaux peints. Les icônes que les touristes fascinés ramènent d'Europe de l'Est sont souvent des faux vendus par des escrocs. Deux tiers de ces peintures sont des productions récentes, fabriquées et vieillies artificiellement.



Ikône récente (peinte en 1972).



Ikône russe ancienne datée de 1770.

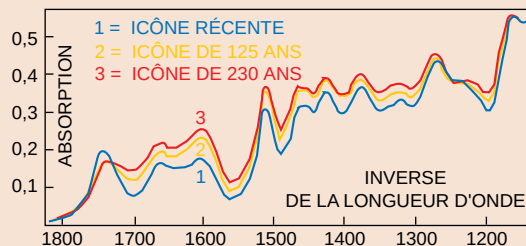
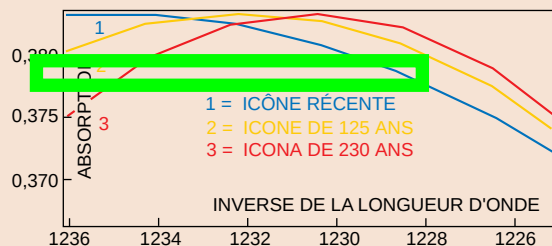


Ikône russe authentique datée de 1875.

Les couleurs, les techniques artistiques et les sujets des icônes sont fondés sur une tradition millénaire qui laisse peu de place à la créativité individuelle. Le style uniforme est facilement copiable. Les icônes récentes sont souvent dépeintes avec la présence de la superposition des couches qui distinguent une icône originale d'une peinture sacrée plus commune.

Les icônes traditionnelles sont des peintures réalisées par des religieux qui peignent leurs œuvres après de longues périodes de prière et de jeûnes. Conformément aux canons, les artistes peignent le visage en plusieurs couches, commençant par le noir (la nuit), le jaune (le Soleil) puis le blanc (le jour). Le relief qui s'ensuit est visible quand on rase la peinture avec une lame.

Une icône est, au cours des siècles, souvent restaurée, notamment les panneaux de bois et les peintures. Les interventions réalisées avec des matériaux différents de ceux d'origine peuvent être révélées par des techniques particulières d'éclairage. Ainsi la lumière de la lampe de Wood entraîne une fluorescence du plâtre utilisé pour combler les fissures pendant une restauration.





élimine les substances contaminantes et autorise la datation, même si la marge d'erreur est alors supérieure.

On pouvait penser qu'une exposition prolongée à de hautes températures ou à des conditions climatiques particulières (forte humidité, par exemple) entraînerait un vieillissement accéléré. Nous avons vérifié que, lorsque le bois est soumis à un vieillissement artificiel par une irradiation aux ultraviolets et une exposition à la vapeur d'eau, les effets majeurs se limitent à la seule surface et ne changent que la couleur, principalement en raison de la détérioration de la lignine.

À deux ou trois millimètres de profondeur, le bois demeure intact. Même quand il est soumis à un chauffage prolongé ou à de hautes températures (inférieures à 180 °C, car au-delà commencent les réactions de pyrolyse), le lent processus de vieillissement n'est pas notablement modifié, et les molécules utiles pour la datation spectroscopique restent inchangées.

L'éventualité d'une erreur de datation due à l'utilisation d'un bois ancien pour la création d'un objet récent est très faible. Le bois se patine en surface, est attaqué par des vers (qui ont, nous l'avons vu, des particularités reconnaissables) et montre des signes d'usure reconnaissables. Un laboratoire ou un antiquaire habile reconnaissent un bois ancien, avant même que l'objet ne soit daté par spectroscopie infrarouge.

Pour établir l'âge d'une œuvre par la méthode spectroscopique, il faut prélever quelques milligrammes de sciure de bois. On fore pour cela un petit trou dans un endroit peu visible. Lors d'une première perforation superficielle, la surface externe contaminée du bois est éliminée, puis une perforation plus profonde permet de recueillir quelques milligrammes de sciure saine.

Nombre de collectionneurs et de conservateurs de musées répugnent à extraire du bois de leurs trésors. Toutefois ces prélèvements sont minimes : les vers creusent des galeries qui font parfois 1 000 fois plus de dégâts qu'un foret fin. L'obtention d'une certification sans erreur ne justifie-t-elle par une petite opération ?

6. LA DAME AU VOILE, peinte par Rogier Van der Weyden en 1459 (à gauche), et une copie récente (à droite).

La sciure extraite est mélangée à un minéral transparent aux infrarouges, et le mélange obtenu est fortement comprimé en une pastille, qui est introduite dans le spectromètre. La transparence du disque ne contenant que quelques fibres de bois montre la faible quantité de matière nécessaire à une datation.

Certaines essences de bois sont rarement utilisées par les ébénistes, les peintres et les sculpteurs, et leur datation est imprécise. Au contraire, il existe depuis quelque temps des tables de datation étalonnées et ajustées (avec une barre d'erreur de dix ans) pour des essences courantes comme le sapin, le pin, le chêne, l'érable, le peuplier ou le tilleul. Un échantillon de sciure est suffisant pour déterminer, avec cette marge d'erreur, l'âge d'une sculpture en bois, d'un chevron provenant d'une vieille maison ou d'un panneau peint.

Meubles et peintures

La datation du mobilier est un peu plus délicate. Un meuble peut non seulement avoir été restauré avec du bois neuf, mais aussi avoir été modifié au cours de sa vie par l'addition de parties entières pour s'adapter à de nouveaux besoins. Avec un tel objet, on doit prélever divers échantillons dans au moins deux ou trois parties différentes, afin de comparer les résultats des analyses. La table de la figure 7, tenue pour avoir été fabriquée en 1740, fut vendue comme authentique par une importante maison de vente aux enchères. La datation spectroscopique a cependant révélé que seuls les quatre pieds datent de 1756 (à 15 ans près), ce qui confirme leur authenticité. En revanche, la spectroscopie infrarouge a déterminé que les autres parties du meuble ne sont vieilles que de 100 ans, au plus. La table est en partie un faux, comme beaucoup d'autres œuvres analogues.

La datation des peintures réalisées entre 1880 et 1930 est particulièrement intéressante. Ces peintures se vendent très cher, et de nombreuses copies sont en circulation. Un âge correct du châssis (le cadre en bois sur lequel la toile est tendue) est une présomption d'authenticité, car pour les peintures relativement récentes on suppose avec raison que l'âge du châssis correspond à l'âge réel de la peinture.



7. SEULS LES QUATRE PIEDS de cette superbe table datent du milieu du XVIII^e siècle. Le reste de la structure en bois a été reconstruite au début du XX^e siècle.

Au contraire, les châssis de peintures très anciennes peuvent avoir pourri ou avoir été détruits et changés lors de restaurations. Si elle ne constitue pas une preuve absolue, la datation permet de confirmer un doute légitime. Le carbone radioactif (dont l'abondance dans l'atmosphère a énormément augmenté à cause des essais nucléaires) permet de détecter de nombreux faux des impressionnistes et des expressionnistes : cet isotope est présent en grande quantité dans les matériaux des faux fabriqués après 1950.

Une petite partie en bois suffit pour dater précisément une œuvre ; ainsi, dans la palette plaquée d'ivoire représentée sur la figure 3, la partie centrale en bois donne une datation spectroscopique intéressante, attribuant à cet objet un âge de 1880 ans à dix ans près.

Le spectromètre distingue aussi aisément les liants et des pigments anciens, permettant ainsi l'identification de nouveaux produits utilisés par des faussaires peu scrupuleux pour copier les œuvres des grands maîtres.

La méthode spectroscopique s'imposera également pour la datation des œuvres d'art primitif. Jusqu'à présent, les évaluations reposaient exclusivement sur l'avis d'experts. Les œuvres en bois des cultures africaines, d'Asie du Sud-Est et d'Amérique centrale sont faites de bois poussant sous des latitudes équatoriales et, donc, soumises à des climats tropicaux, pour lesquels les tables de datation ne sont pas encore disponibles. Bientôt,

cependant, des comparaisons avec des objets datés précisément (appartenant en général aux cultures du Sud-Est asiatique) permettront d'élaborer des tables d'étalonnage pour les bois tropicaux. On pourra enfin déterminer scientifiquement l'année de création des objets d'art primitif. Aujourd'hui la précision de la méthode spectroscopique varie de huit ans, pour les échantillons assez récents, à une trentaine d'années pour les bois très anciens.

Cette précision peut être améliorée grâce aux échantillons de référence dont on disposera à l'avenir. Donnant une mesure exacte de l'âge d'un objet créé dans la période comprise entre 1650 environ et aujourd'hui, la méthode de datation spectroscopique est aussi simple que rapide.

Nature réservée aux centres de recherche, la spectroscopie infrarouge est aujourd'hui courante et peu coûteuse : des collectionneurs privés et des marchands d'antiquités peuvent l'utiliser.

Gottfried MATTHAES est le fondateur du Museo del collezionista d'arte, à Milan.

Gottfried MATTHAES, *Restauro e antiquariato*, De Agostini, 1995.

Gottfried MATTHAES, *Weltkunst*, mai-septembre 1996.

Gottfried MATTHAES, *Manuale Illustrato del Collezionista d'Arte*, The Art Collector's Museum, vol. 1, pp. 80-83, Milan, 1997.

Restauro, Callway, Munich, juillet 1998.

Le langage XML

JON BOSAK • TIM BRAY

Le réseau Internet s'est considérablement développé grâce à la mise au point de systèmes «hypertexte» qui gèrent les images, les textes, les sons. Le langage XML accentuera ce développement.

Quelques indices nous suffisent pour reconstruire une information en jetant un coup d'œil à cette page, et en repérant des mots imprimés en gros caractères, suivis de colonnes en petits caractères, nous déduisons que nous avons sous les yeux le début d'un article. De même, un simple coup d'œil sur une liste de produits d'épicerie montre que celle-ci est une liste de courses. En consultant quelques rangées de chiffres, on identifie un relevé de compte bancaire.

Les ordinateurs n'ont pas cette capacité : on doit leur indiquer précisément la nature des objets qu'on leur fait manipuler, les liens entre ces objets et ce qu'ils sont censés en faire. Le langage XML (*eXtensible Markup Language*, soit «langage de balisage extensible») est conçu justement pour rendre l'information autodescriptive. Ce changement de la communication entre les ordinateurs, simple en apparence, pourrait étendre l'utilisation de l'Internet à nombre d'activités humaines au-delà de la simple transmission d'information. Depuis la création de XML, au début de 1998, par le Consortium W3C (*World Wide Web Consortium*), il s'est répandu comme une traînée de poudre dans les milieux scientifiques et industriels.

Cet engouement s'explique par l'espoir que XML comblera certaines des principales lacunes du réseau Internet. L'une d'elles est la lenteur : sur le réseau Internet, l'information est censée circuler à la vitesse de la lumière, mais, en pratique, elle arrive aux utilisateurs à la vitesse de l'escargot. En outre, bien qu'une quantité phénoménale d'information soit disponible, la recherche

de l'information adéquate est souvent fastidieuse.

Ces deux problèmes sont en grande partie dus à la nature du langage principal du réseau, le langage HTML (l'acronyme de *Hypertext Markup Language*, soit «langage de balisage hypertexte»). Bien que celui-ci soit le langage de publication électronique le plus populaire jamais inventé, il reste superficiel : il décrit seulement comment les programmes de navigation sur le réseau doivent organiser le texte, les images et les boutons sur les pages qu'ils affichent. Cette superficialité de HTML le rend facile à apprendre, mais cette simplicité a un prix.

Notamment, avec HTML, on crée difficilement des sites qui ne se limitent pas à envoyer des documents à ceux qui en font la demande, tels des télécopieurs améliorés. Les particuliers et les entreprises veulent des sites qui enregistrent les commandes des clients, qui

transmettent des dossiers médicaux ou, même, qui gèrent des usines ou des instruments scientifiques à l'autre bout du monde. Le langage HTML n'est pas conçu pour de telles tâches.

Aujourd'hui, un médecin peut récupérer un dossier médical à l'aide d'un navigateur, mais il ne peut ensuite l'envoyer électroniquement à un collègue spécialiste afin qu'il l'intègre directement à la base de données de son hôpital. Son ordinateur ne sait pas quoi faire de l'information, qui n'est que du `<H1>bla bla </H1> <BOLD>bla bla bla</p> </BOLD>`. Le problème avec le «Ce Que Vous Voyez Est Ce Que Vous Obtenez» (la traduction française de *What You See Is What You Get* ou WYSIWYG), c'est

que ce que vous voyez n'est que ce que vous obtenez.

Les étiquettes entre crochets, dans l'exemple précédent, sont des balises. Le langage HTML ne possède pas de balise qui signale une réaction allergique à des médicaments, par exemple ; sa rapidité est une autre de ses limites. L'adjonction d'un nouveau type de balises impose des démarches administratives qui peuvent prendre des années si bien que peu s'y aventurent. Pourtant, chaque application, et pas seulement l'échange de dossiers médicaux, nécessite ses propres balises.

Cette lenteur explique également la lenteur actuelle des bibliothèques en ligne, des catalogues de vente par correspondance ou des divers sites interactifs. Quand on veut modifier les quantités commandées ou le mode d'acheminement des marchandises, le serveur doit renvoyer une nouvelle page, composée de texte et des graphiques déjà reçus. Pendant ce temps, votre ordinateur attend bêtement, parce qu'il ne connaît que les `<H1>` et les `<BOLD>`, et non les prix et les options de transport.

De la recherche aux ventes, les recherches frustrantes sur le réseau. Parce qu'il n'existe pas de moyen de signaler qu'une donnée est un prix, vous ne pouvez pas utiliser les informations tarifaires dans vos recherches.

Comment faire du neuf avec du vieux ?

En théorie, le problème serait résolu si des balises décrivaient le contenu de l'information et non sa présentation. Par exemple, au lieu de classer les différentes composantes d'une commande d'après les rubriques «caractères gras», «paragraphe», «ligne» et «colonne» (ce que fait le langage HTML), on les dénommerait «prix», «taille»,



«quantité» et «couleur». De la sorte, un programme identifierait un document contenant ces rubriques comme étant une commande, et il le générerait de manière simple : il pourrait l'afficher, le rentrer dans un système de gestion ou vous faire livrer une nouvelle chemise demain.

Dès 1996, un groupe de travail comprenant une dizaine de membres du Consortium W3C a exploré une telle solution. L'idée, bien que puissante, n'était pas entièrement originale : depuis des générations, les éditeurs annotent les manuscrits pour guider les typographes. Ce système de balisage (*markup* en anglais) s'est progressivement formalisé jusqu'à ce qu'en 1986, après des années de travail, l'Organisation des normes internationales (ISO) approuvât un système pour la création de nouveaux langages de balisage.

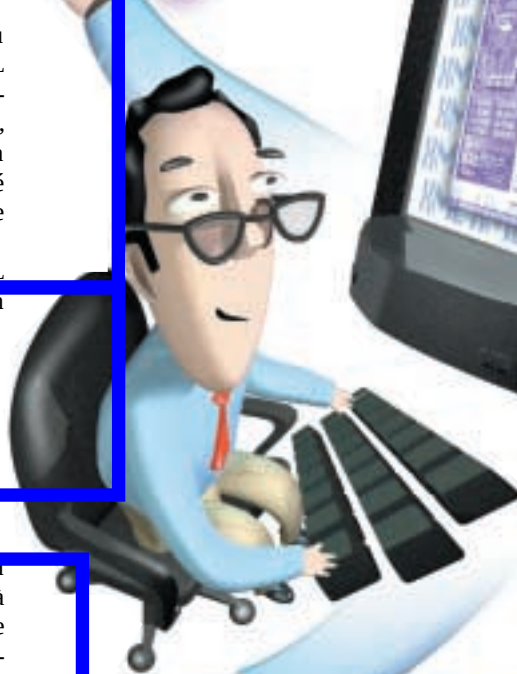
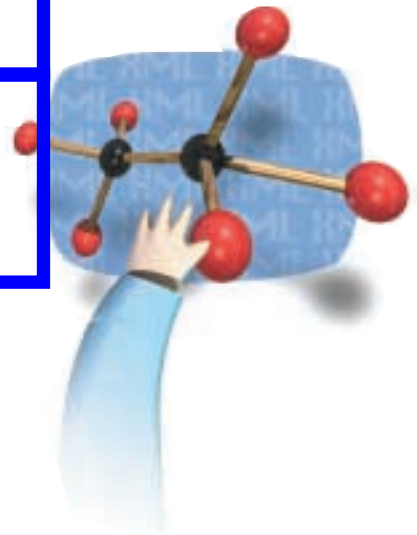
Nommé SGML (pour *Standard Generalized Markup Language*, soit «langage de balisage généralisé standard»), ce métalangage (langage de description de langages) a fait la preuve de son utilité dans l'édition. Le langage HTML lui-même a été défini à partir du SGML. Le seul inconvénient du SGML est qu'il est trop général, plein d'astuces destinées à minimiser les frappes, à une époque où chaque octet avait un coût non négligeable. Sa complexité est excessive pour les programmes de navigation.

Notre groupe de travail a créé XML en épurant le SGML pour obtenir un métalangage plus simple. XML est un ensemble de règles que chacun peut suivre pour créer un langage de balisage. Les règles de XML garantissent qu'un seul programme simple et compact, souvent nommé analyseur, est capable de traiter tous ces nouveaux langages.

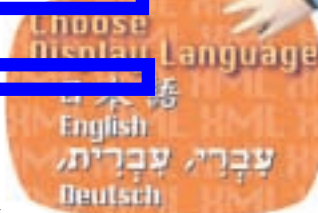
Reprenons l'exemple du médecin qui veut envoyer un dossier médical à un spécialiste. Si le corps médical utilise XML pour fabriquer un langage de balisage des dossiers médicaux (plusieurs groupes étudient ce cas précis), le courrier électronique

d'un médecin signalera une réaction à des médicaments par un code tel que `<patient> <nom> Moreau </nom> <allergie_medicamenteuse> pénicilline </allergie_medicamenteuse> </patient>`. Un programme très simple permettra à un ordinateur de comprendre cette notation médicale standard et d'ajouter cette statistique vitale à une base de données.

Comme le langage HTML, qui permet à tous les utilisateurs d'ordinateurs de lire les documents sur l'Internet, XML pourrait être le nouvel espoir informatique. De surcroît, à la différence de la plupart des formats de données informatiques, les



1. LE LANGAGE XML est un pont entre des systèmes informatiques hétérogènes. Il permet la recherche d'informations, l'échange de données scientifiques, de produits commerciaux et de documents multilingues avec une vitesse et une facilité accrues.



notations XML ont un sens pour les humains, puisqu'elles sont composées de texte ordinaire.

Le potentiel unificateur de XML résulte de quelques règles bien choisies. L'une d'entre elles stipule que les balises vont presque toujours par paires. Comme les parenthèses, elles encadrent le texte auquel elles se rapportent. Comme des guillemets, les paires de balises peuvent être emboîtées.

La règle d'emboîtement simplifie les documents XML en leur conférant une structure d'arbre. À la manière d'un arbre genealogique, chaque graphique ou morceau de texte du document représente un parent, un enfant ou un frère ; les parenthèses sont sans ambiguïté. Les arbres ne peuvent pas représenter n'importe quelle information, mais ils représentent la plupart des types d'information nécessaires au fonctionnement des ordinateurs. De

surcroît, les arbres sont informatiquement très pratiques. Si un relevé de compte bancaire se trouve sous forme d'un arbre, on écrit très simplement un petit programme qui ordonne les transactions ou qui affiche seulement les chèques tirés avant une certaine date.

Le potentiel unificateur de XML s'accroît de son association avec Unicode, un système de codage de caractères qui autorise le mélange de textes dans les principales écritures de la planète. En

Bases de données XML

Peut-on considérer un répertoire de quelques milliers ou millions de documents XML comme une base de données et y retrouver des informations avec la même efficacité qu'avec des systèmes classiques de gestion de bases de données ? Imaginons que, demain, des milliers de musées dans le monde publient leurs catalogues de collections et d'expositions en XML et placent ces documents sur des serveurs Web. Si l'on demande à un moteur de recherche : « Existe-t-il un portrait de Blaise Pascal, et si oui qui en est l'auteur ? », obtiendrons-nous la réponse « Philippe de Champaigne » sans qu'elle soit noyée sous un déluge d'informations non pertinentes ayant trait à tous les Pascal de l'Univers, ou, au moins, à toutes les œuvres, à tous les commentaires ou biographies écrits à propos de Blaise Pascal ? Avec son système de balisage, XML peut grandement faciliter la recherche, même si, à elle seule, cette norme ne résout pas toutes les difficultés de la recherche de l'information en ligne.

Pour améliorer la recherche d'information sur le Web, plusieurs approches non exclusives sont envisageables. L'une d'elles, mentionnée par J. Bosak et T. Bray, est celle des « métadonnées », la transposition au monde numérique des pratiques des bibliothécaires et des documentalistes : à chaque document, on associe une « fiche signalétique ». Ces fiches peuvent être rangées dans un catalogue (une base de données) d'où elles peuvent être rapidement retrouvées. Cette approche, appliquée au Web, ne convainc pas, loin s'en faut : nous ne sommes pas tous des documentalistes et, s'il fallait systématiquement créer et gérer des fiches descriptives précises pour chaque document numérique mis sur le réseau, le coût et la complexité seraient rédhibitoires. Or, si ces fiches sont trop simplifiées, elles ne permettent plus cette précision dans la recherche d'information qui est l'objectif visé.

Une variante consiste à indexer les documents par les termes figurant dans certains éléments bien choisis des documents eux-mêmes : les métadonnées descriptives doivent être insérées dans les documents. Si toutes les informations pertinentes figurent explicitement dans les documents et y sont identifiées par des balises, il n'est nul besoin de créer une fiche descriptive avec un nom d'auteur, un titre, une date de publication, des mots clefs, etc.

Le problème devient alors de partager des systèmes de balisage communs pour ces éléments devant servir à

l'indexation des documents, tout en sachant que ces balises doivent aussi être utilisées directement dans les documents les plus divers, aux structures les plus variées et écrits dans des langues différentes. Il reste aussi à inventer des méthodes de recherche qui exploitent ces index créés à partir de ces fragments de documents et qui restent efficaces lorsque le nombre de documents indexés devient très grand.

Une autre approche consiste à structurer différemment l'hypertexte que forme le Web. Aujourd'hui les liens relient entre eux des fichiers, et, pour un ordinateur, un lien du Web signifie seulement une adresse physique de fichier sur le réseau. Si vous voyez dans une page Web la phrase « Vous pouvez contacter l'auteur... », avec le mot auteur mis en valeur par une couleur et un soulignement, vous savez qu'il s'agit d'un lien qui matérialise la relation qui existe entre le document que vous lisez et son auteur, représenté par son adresse de courrier électronique ou sa page d'accueil. Pourtant vous ne pouvez pas demander à un serveur Web de vous retourner l'adresse électronique des auteurs des pages hébergées : l'information existe, mais sous une forme inexploitable pour un programme. Or, XML permet de typer les liens, c'est-à-dire de spécifier leur sémantique, soit directement, soit en les décrivant comme des relations entre documents dans le système descriptif du langage.

Si les auteurs utilisent des liens qui correspondent à des relations prédéfinies (être auteur de, être une biographie de, être localisé à, etc.), le Web se transforme en une sorte de « graphe conceptuel », et il permet au moins la recherche des groupes de documents par l'exploitation de ces relations explicites définies entre eux.

Ces approches et plusieurs autres sont activement explorées par les spécialistes des bases de données et de la recherche d'information en ligne. Il est d'ailleurs probable qu'aucune méthode ne satisfait à elle seule tous les besoins et que l'on utilisera un ensemble de méthodes complémentaires. Une chose est sûre en tout cas : l'arrivée de XML a relancé et orienté la recherche dans ce domaine et sera la source de grands progrès en matière de recherche d'information en ligne.

Alain MICHARD, INRIA, Rocquencourt

HTML, comme dans la plupart des programmes de traitement de texte, un document est en général dans une seule langue : français, japonais, arabe... Si le programme ne sait pas lire les caractères de la langue de l'utilisateur, ce dernier ne peut pas utiliser le programme. Mais encore, les logiciels destinés à être utilisés à Taiwan sont souvent incapables de lire les textes issus de la Chine continentale, à cause d'incompatibilités du codage des caractères. Au contraire, un programme qui comprend correctement le XML peut faire face à n'importe quelle combinaison de ces jeux de caractères. XML permet l'échange d'information non seulement entre des systèmes informatiques différents, mais aussi au travers des barrières nationales et culturelles.

La fin de l'attente

L'avènement de XML devrait accélérer les échanges sur le réseau Internet. Aujourd'hui, les ordinateurs connectés au réseau, quelle que soit leur puissance, récupèrent des formulaires, les remplissent et leur font faire la navette jusqu'à un serveur, jusqu'à l'aboutissement de la requête. L'information structurée et sémantique qu'ajoute XML permet aux ordinateurs de faire une bonne partie du traitement localement, sans intervention des serveurs distants, qui se trouvent soulagés d'autant. En outre, le trafic sur le réseau sera également réduit.

Pourquoi ce gain de rapidité? Imaginez que vous vous connectiez au site Internet d'une agence de voyages afin de connaître tous les vols Paris-New York du 11 août. Vous recevez une liste plus longue que ce que votre écran peut afficher. Comment préciser votre choix? En spécifiant l'heure approximative de départ, la gamme de prix ou la compagnie aérienne que vous désirez emprunter. Toutefois, pour obtenir cette liste écourtée, vous devrez envoyer une nouvelle requête au serveur de l'agence de voyages et attendre la réponse. Si la longue liste de vols avait été envoyée en XML, l'agence de voyages aurait pu vous fournir, en même temps que les caractéristiques des vols, un petit programme (en langage Java) que vous auriez pu utiliser sur votre machine pour faire un tri à votre convenance en quelques microsecondes, sans solliciter à nouveau le serveur (voir la

figure 2). Ce gain de temps, multiplié par plusieurs millions d'utilisateurs, sera la cause d'une amélioration notable du réseau Internet.

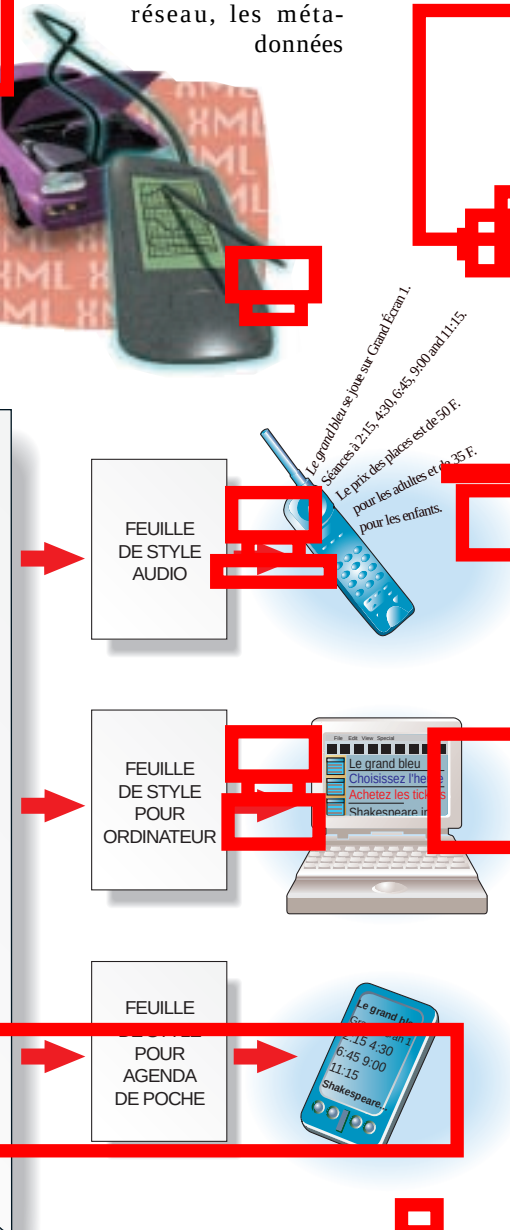
Plus l'information circulant sur le réseau sera étiquetée avec des balises XML spécifiques à chaque corps de métier, plus on trouvera facilement des informations précises. Aujourd'hui une recherche d'«offres d'emploi d'ingénieur système» récupère beaucoup de publicités, mais peu d'offres, parce que la plupart sont dans les services de petites annonces des sites des divers journaux, hors de portée des moteurs de recherche. L'Association américaine de la presse écrite met au point, pour les petites annonces, un langage de balisage fondé sur XML qui rendra de telles recherches plus fructueuses.

L'efficacité des recherches augmentera encore quand on utilisera une technique employée par les bibliothécaires. Depuis longtemps, ces derniers savent que le meilleur moyen de trouver une information rapidement n'est pas de rechercher l'information elle-

même, mais plutôt des ensembles de données plus spécifiques, qui orientent vers les sources utiles. Ces informations sur l'information, dont les catalogues de bibliothèque sont un bon exemple, sont des métadonnées.

Depuis le début du projet XML, on envisage la création d'un standard pour les métadonnées, fondé sur le langage XML lui-même. Le «système descriptif de ressources» RDF (*Resource Description Framework*), publié en février 1999, est l'équivalent pour les données Internet des catalogues pour les livres de bibliothèque. Sur le réseau, les métadonnées

```
<movies>
<title> Le grand bleu</title>
<star> Jean Reno</star>
<star> Josiane Balasko</star>
<theatre>
<theatrename> Grand Écran 1</theatrename>
<showtime> 1415</showtime>
<showtime> 1630</showtime>
<showtime> 1845</showtime>
<showtime> 2100</showtime>
<showtime> 2315</showtime>
<price>
<adultprice>50</adultprice>
<childprice>35</childprice>
</price>
</theatre>
<theatre>
<theatrename> Ciné Cité 2</theatrename>
<showtime> 1930</showtime>
<price>
<adultprice>40</adultprice>
</price>
</theatre>
</movies>
<movie>
<star> Gwyneth
```



2. RÉDIGÉ DANS LE LANGAGE XML, un document qui contient les programmes de cinéma d'une ville peut être visualisé sur des machines différentes. Des «feuilles de style» filtrent, réarrangent et affichent l'information : elles engendrent des documents comprenant des graphiques pour les ordinateurs de bureau, des fichiers composés exclusivement de texte pour les agendas de poche ou des messages vocaux pour les téléphones.

rendront la recherche de l'information bien plus rapide et précise qu'elle ne l'est aujourd'hui. Comme le réseau n'a pas de bibliothécaires et que tous les auteurs de site souhaitent que leur site soit connu, nous prévoyons que le RDF accroîtra le trafic Internet lorsque son potentiel sera reconnu.

D'autres méthodes que les moteurs de recherche permettent de retrouver de l'information. Le réseau est avant tout un hypertexte dont les millions de pages sont reliées par des liens, des mots soulignés sur lesquels on clique pour passer de page en page. XML rendra plus efficace l'utilisation des liens : un standard d'hypertexte fondé sur XML, XLink, dont les spécifications seront publiées cette année par le Consortium W3C, permettra de choisir des destinations multiples à partir d'une liste. D'autres types de liens feront apparaître du texte ou des images au lieu de faire quitter la page.

Mieux encore, XLink permettra aux auteurs d'insérer des liens directs,

qui dirigeront vers des rubriques dans une base de données centrale plutôt que vers des pages cibles elles-mêmes. Lorsque l'adresse d'une page changera, l'auteur pourra mettre à jour tous les liens qui s'y rapportent en modifiant un seul enregistrement dans la base de données. Cette procédure devrait contribuer à faire disparaître les erreurs fréquentes de type «404 File Not Found» qui se produisent quand les liens hypertexte sont cassés.

Grâce à un traitement plus efficace, à des recherches plus précises et au système de liens perfectionné, la structure

du réseau sera transformée, et ses utilisateurs bénéficieront de moyens nouveaux pour accéder à l'information.

Une nécessaire refonte

Ce perfectionnement nécessite du soin et du travail. Si XML permet la mise au point de langages sur mesure, la conception de bons langages reste difficile. La conception n'est en outre qu'un premier stade : pour que la signification d'une balise soit claire, on doit rédiger des explications et créer de petits programmes pour que les ordinateurs puissent les intégrer.

Horaires des vols - JFK - N... - N... - N...

Heure	Date	Origine	Destination	Compagnie	Prix
8h 00	11/08/99	Paris (CDG)	New York (JFK)	Vif Air	115
8h 45	11/08/99	Paris (CDG)	New York (JFK)	Vif Air	118
8h 55	11/08/99	Paris (CDG)	New York (JFK)	Vif Air	120
10h 00	11/08/99	Paris (CDG)	New York (JFK)	Vif Air	116
10h 55	11/08/99	Paris (CDG)	New York (JFK)	Vif Air	121
12h 00	11/08/99	Paris (CDG)	New York (JFK)	Vif Air	119
13h 15	11/08/99	Paris (CDG)	New York (JFK)	Vif Air	117
13h 55	11/08/99	Paris (CDG)	New York (JFK)	Vif Air	122
14h 00	11/08/99	Paris (CDG)	New York (JFK)	Vif Air	125
14h 00	11/08/99	Paris (CDG)	New York (JFK)	Vif Air	127
14h 05	11/08/99	Paris (CDG)	New York (JFK)	Vif Air	129

Confirmation du vol - N... - N... - N...

Conditions générales :

Doit rester une nuit de sommeil par place.

Les billets ne sont pas remboursables.

Un changement de destination coûtera 300 francs en plus du changement de prix.

Recherche de vols - N... - N... - N...

Essaye notre moteur de recherche et tu verras que c'est plus facile.

Réserver un vol

Ville de départ : []

Ville d'arrivée : []

1 adulte

Cette recherche



3. UN LIEN XML conduit à un menu qui comprend plusieurs options. L'une d'elles insère une image sur la page courante, tel le plan d'occupation des sièges de l'avion (flèche rouge). D'autres options déclenchent un petit programme de réservation de vol (flèche jaune) ou révèlent un texte caché (flèche verte). Les liens peuvent aussi, comme en HTML, aboutir à d'autres pages.

S'il suffisait d'étiqueter un bon de commande avec une balise «commande» pour que l'ordinateur puisse le traiter, nous n'aurions pas besoin de XML. Nous n'aurions même pas besoin de programmeurs, les ordinateurs se débrouilleraient tout seuls.

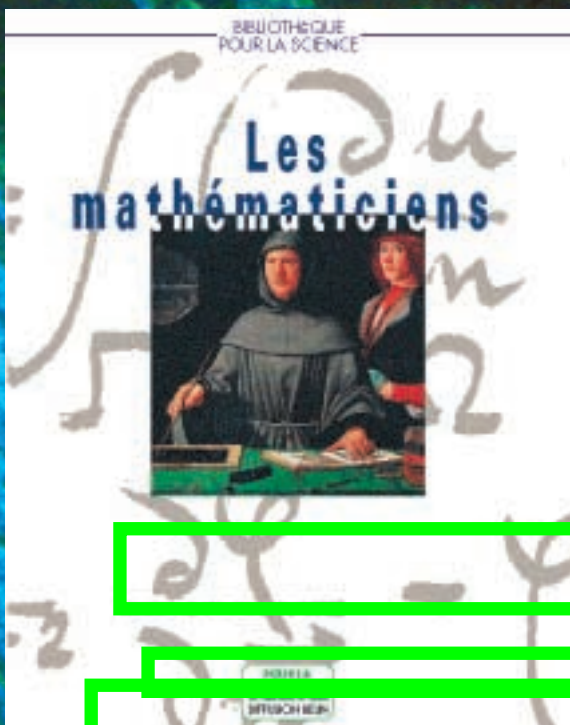
Le langage XML n'est pas magique, mais il est efficace ; il définit des règles de base qui éliminent une couche de programmation correspondant à des détails, de sorte que des personnes partageant les mêmes intérêts peuvent se concentrer sur la véritable difficulté : s'entendre sur la façon dont ils souhaitent représenter l'information qu'ils échangent couramment. Ce problème n'est pas simple, mais il n'est pas nouveau.

Ces harmonisations sont incontournables, car la prolifération de systèmes informatiques incompatibles a engendré des retards, des coûts et de la confusion dans la plupart des activités humaines. Les utilisateurs de l'informatique veulent échanger des idées ou faire des affaires sans utiliser tous les mêmes ordinateurs ; des langages d'échange spécifiques à chaque activité y contribuent grandement. De fait, l'avalanche d'acronymes se terminant par ML témoigne de la créativité qui s'exprime grâce à XML en sciences ou dans le monde des affaires (voir l'encadré de la page 52).

Les concepteurs d'un nouveau langage doivent s'accorder sur trois points : quelles balises seront acceptées, comment les éléments balisés pourront être emboîtés et comment ils seront traités. Les deux premières spécifications, le vocabulaire du langage et sa structure, sont codifiées dans une définition de type de document (ou DTD). Le standard XML n'impose pas de telles définitions, mais la plupart des nouveaux langages en comporteront probablement, parce qu'elles simplifient le travail des programmeurs. Ces derniers doivent en effet écrire des programmes qui comprennent le balisage et s'en servent intelligemment.

Les programmeurs auront également besoin d'un ensemble de directives qui décrivent en langage intelligible ce que signifient toutes les balises. Le langage XHTML, par exemple, est défini par une DTD et par quelques centaines de pages de descriptions que consultent les programmeurs quand ils écrivent des programmes de navigation ou d'autres programmes pour le réseau Internet.

BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE



LES MATHÉMATICIENS

Pour comprendre le processus de la création mathématique, il faut saisir ce qui fait l'originalité d'un mathématicien. Cet ouvrage réunit les portraits de quinze grands mathématiciens. Leurs rapports avec leur époque, le regard qu'ils portent sur leur activité sont plus qu'anecdotiques : ils révèlent la genèse des idées nouvelles et mettent en lumière le caractère audacieux, dynamique et imaginaire de l'invention mathématique.

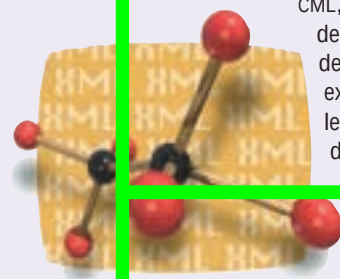
Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Les nouveaux langages des sciences

Grâce à XML, les scientifiques échangent plus facilement des théories, des calculs et des résultats expérimentaux. Depuis longtemps, les mathématiciens étaient frustrés par l'inaptitude des navigateurs à afficher les expressions mathématiques autrement que sous forme d'images. Le langage MathML, opérationnel depuis le printemps 1999, leur permet de couper des équations dans les pages Internet et de les coller directement dans leurs logiciels de calcul formel, en vue de les utiliser pour des calculs ou pour des graphiques.

Les chimistes vont plus loin encore : ils ont mis au point de nouveaux navigateurs pour leur langage CML (*Chemical Markup Language*), fondé sur XML, qui donne des représentations graphiques de la structure moléculaire des composés décrits dans les pages Internet.



CML, de même que le langage de l'astronomie, en cours de mise au point, aide les chercheurs à explorer rapidement une multitude de citations de revues pour en extraire les articles correspondant à leur sujet d'étude : les astronomes, par exemple, peuvent rentrer les coordonnées célestes d'une galaxie, afin de récupérer une liste d'images, d'articles et de données instrumentales sur l'objet en question.

XML sera utile pour la réalisation d'expériences aussi bien que pour l'analyse de leurs résultats. En 1998, les ingénieurs de la NASA ont entrepris de mettre au point l'AIML (*Astronomical Instrument ML*, soit « langage ML pour les instruments astronomiques »), qui commande le télescope infrarouge SOFIA lors de ses vols stratosphériques à bord d'un Boeing 747. A terme, AIML permettra aux astronomes du monde entier de commander des télescopes et, peut-être même, des satellites, par l'intermédiaire d'un simple logiciel de navigation sur le réseau Internet.

Pendant ce temps, sur Terre, les généticiens utiliseront bientôt BSML (*Biosequence ML*), afin d'échanger et de manipuler les quantités énormes d'information qui résultent des innombrables projets de séquençage du génome. Un navigateur BSML, mis au point et distribué gratuitement par la Société *Visual Genomics*, permet aux chercheurs de fouiller de gigantesques bases de données de code génétique et d'afficher les fragments trouvés sous forme de cartes et de tableaux, bien plus explicites que les suites de lettres habituelles.

Question de style

Les utilisateurs, eux, sont préoccupés de ce que font les programmes, et non de leur description. Ils veulent que les programmes affichent de manière intelligible l'information codée en XML, mais les balises XML ne donnent pas d'indications sur la présentation de l'information sur l'écran ou sur le papier.

Cette caractéristique est d'ailleurs un avantage pour les éditeurs, qui veulent souvent réutiliser le contenu d'un document, c'est-à-dire décliner une publication sous une multitude de formes, imprimées ou électroniques. En balisant le contenu d'un texte pour en décrire son sens, XML autorise cette publication multiple, indépendamment du type de support. Les éditeurs peuvent ensuite appliquer des règles organisées en feuilles de style pour mettre en forme automatiquement le passage sous diverses formes. Le standard pour les feuilles de style XML, en cours de mise au point, est XSL (pour *eXtensible Stylesheet Language*).

Les versions les plus récentes de certains navigateurs Internet peuvent lire un document XML, récupérer la feuille de style appropriée, et l'utiliser pour tirer et formater l'information sur l'écran. L'utilisateur ne verra pas la différence entre des informations codées par HTML ou par XML, mais l'accès aux sites XML sera bien plus rapide.

Les milieux gagnent beaucoup de cette approche de l'édition, car les feuilles de style leur permettront de présenter un document XML en braille ou sous forme parlée. De même, les pages Internet pourront être lues à voix haute par les ordinateurs de bord des voitures (voir la figure 2).

Un traducteur universel

Bien que le réseau Internet ait été créé par le milieu universitaire et scientifique, c'est l'industrie et le commerce qui, attirés par les potentialités du système, ont suscité son expansion fulgurante. Le commerce électronique s'est imposé, mais les transactions entre entreprises se développent au

moins aussi rapidement. Les industries aimeaient utiliser le réseau pour régler leur production sur les commandes qu'elles enregistrent, mais cet ajustement, qui limiterait les stocks, impose une automatisation des chaînes de production et des communications avec les fournisseurs de matière premières ou de pièces détachées. Or, les interactions de systèmes informatiques sont gênées par l'hétérogénéité des traitements.

Depuis des siècles, les affaires se font par l'échange de documents standardisés : bons de commande, factures, reçus. Ces documents assurent les interactions des parties concernées. Chaque document contient exactement ce que son destinataire a besoin de savoir, et rien de plus. De même, l'échange de documents reste le fondement des transactions commerciales en ligne, mais le langage HTML n'a pas été conçu pour ces échanges. En revanche, XML a été conçu pour l'échange de documents, et nous ne doutons pas que le commerce électronique mondial reposera largement sur la circulation de transactions matérialisées par des millions de documents XML échangés par l'Internet.

Ainsi, le réseau renforcé par XML sera plus rapide, plus convivial et mieux adapté aux affaires. En contrepartie, les concepteurs des sites auront plus de travail. Des bataillons de programmeurs seront nécessaires pour tirer un plein parti des nouveaux langages XML. Bien que les jours des autodidactes du réseau ne soient pas encore comptés, l'espoir est en danger. Les concepteurs de demain devront être versés non seulement dans la production de textes et de graphiques, mais aussi dans la construction de systèmes combinant à plusieurs niveaux des arbres de données, des structures de liens hypertexte, des métadonnées et des feuilles de style, qui, ensemble, constituent l'infrastructure robuste du réseau de deuxième génération.

Jon BOGAK, qui travaille pour la Société Sun Microsystems, est président du groupe de coordination XML du Consortium W3C. Tim BRAY, fondateur de la Société *Textuality*, est coéditeur de la norme XML 1.0.

Alain MICHARD, *XML : langage et applications*, Eyrolles, 1998.

Des liens pour cet article sont disponibles sur notre site : <http://www.pourlascience.com>

Cônes et toxines

FRÉDÉRIC LE GALL • PHILIPPE FAVREAU • GEORGES RICHARD

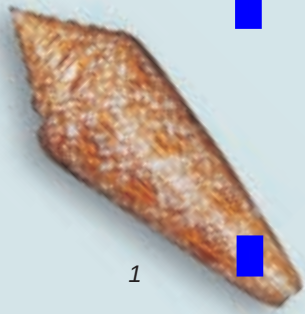
Pour paralyser leurs proies, ces coquillages utilisent des venins qui contiennent d'innombrables toxines dont l'action est très spécifique. Certaines ont été isolées et seraient utilisées comme analgésiques et comme anticonvulsivants chez l'homme.

En 1796, lors d'une vente aux enchères, une œuvre du peintre flamand Vermeer, la *Femme en bleu lisant une lettre* est vendue 43 florins. A la même enchère, un spécimen de *Conus cedonulli*, un mollusque marin de cinq centimètres de longueur, est vendu plus de six fois plus cher !

La famille des Conidae suscitait déjà l'enthousiasme chez les collectionneurs et les artistes. Selon le naturaliste Lamarck, «le genre cône est le plus beau, le plus étendu et l'un des plus considérables de la classe des univalves. C'est celui qui renferme les coquilles les plus précieuses et en même temps les plus remarquables, soit par la régularité de leur forme, soit par l'éclat et l'admirable variété de plusieurs d'entre elles. Aussi sont-elles très recherchées des amateurs».

Aujourd'hui, si les collectionneurs sont toujours aussi nombreux, c'est le venin produit par les Conidae, ou cônes, qui intéresse les biologistes et surtout les neurobiologistes. Les toxines contenues dans ces venins, nommées conotoxines, perturbent le fonctionnement du système nerveux et des muscles. Les cônes utilisent une panoplie de conotoxines qui, agissant en synergie, paralyse les proies.

Ces toxines ont des cibles spécifiques et sont utilisées par les biologistes pour étudier certaines fonctions du système nerveux et pour caractériser de nouveaux types de récepteurs et de canaux ioniques. Leur spécificité d'action physiologique fait de ces toxines des agents utilisables dans le traitement de la douleur et des convulsions, notamment dans les épilepsies.



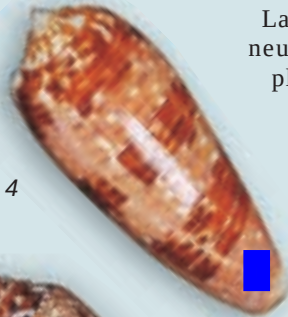
1



2



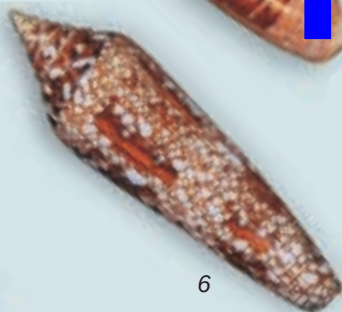
3



4



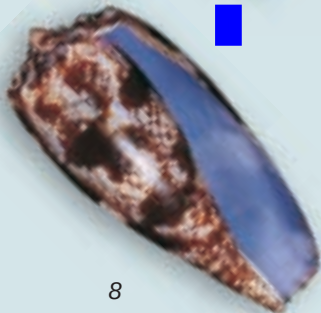
5



6



7



8



9



10



11



12



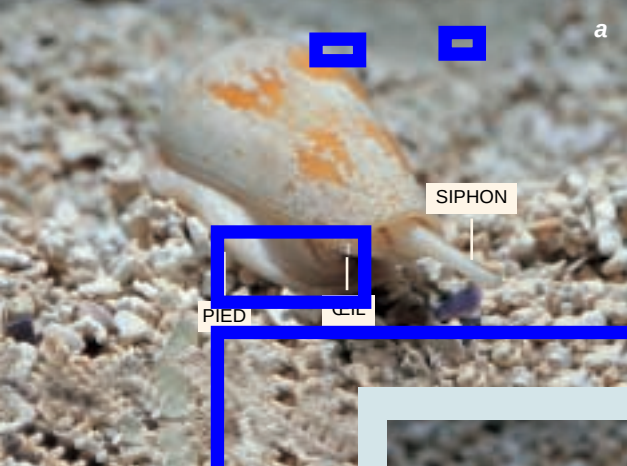
13



14



15



L'appareil venimeux

Les Conidae ont élaboré cette panoplie de conotoxines aux actions spécifiques au cours de leur évolution. Ils appartiennent à une famille de mollusques gastéropodes regroupant tous les cônes. Les premiers cônes sont apparus au début de l'Éocène, il y a un peu moins de 60 millions d'années. Au Lutécien (il y a 40 à 50 millions d'années), la famille commence à se développer, et les espèces fossiles de cette période abondent dans le Bassin parisien et en Normandie. Les premiers cônes piscivores, qui se nourrissent essentiellement de poissons, apparaissent peut-être au cours du Miocène (entre 23 et 5 millions d'années). Aujourd'hui, la famille des Conidae compte plus de 600 espèces, vivant principalement dans les eaux peu profondes de la région Indo-Pacifique, souvent associées aux récifs coralliens. Les cônes sont également présents dans l'Atlantique tropical et le long des côtes africaines de l'Atlantique. Certains cônes ont été récoltés à plusieurs centaines de mètres dans la région néo-calédonienne, lors de campagnes menées par le Muséum national d'histoire naturelle et l'Institut pour la recherche et le développement (IRD).

Les cônes qui vivent en eau peu profonde fréquentent tantôt le substrat corallien mort, tantôt les accumulations détritiques grossières ou les cuvettes sableuses. Dans leur milieu naturel, ils ne laissent apparaître que le siphon inhabitant, qui leur sert à respirer et à repérer leurs proies par chimiotactisme et, parfois, située au-dessous et dépassant à l'extrémité de l'animal, la bouche dont l'enveloppe porte les pédoncules oculaires. L'animal rampe à l'aide d'un pied

musculaire, en grande partie masqué par la coquille. Extrêmement variables, les coloris du siphon et du pied ne varient guère au sein d'une même espèce.

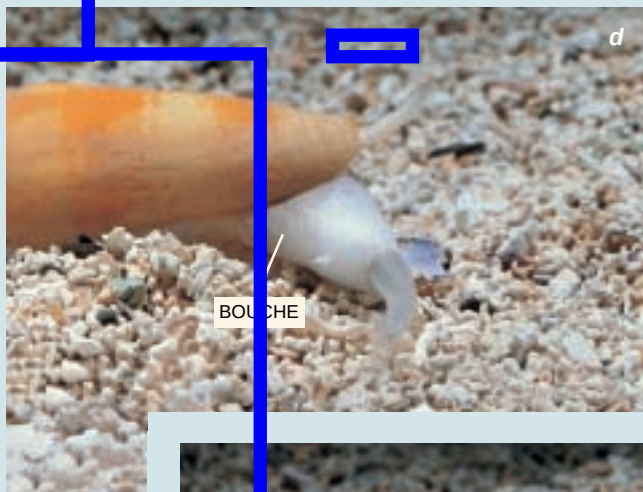
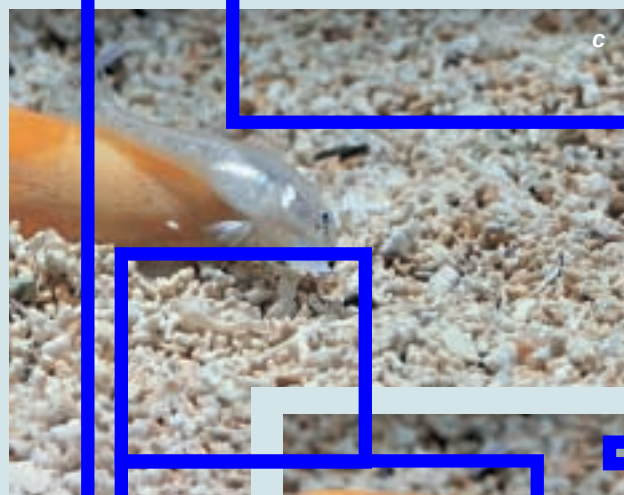
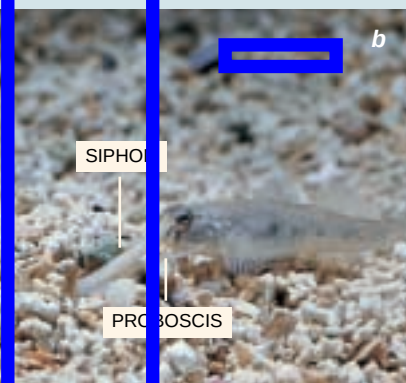
Sous cette apparence inoffensive, ces cônes sont de redoutables prédateurs carnivores. Ils ont tous un appareil venimeux qui

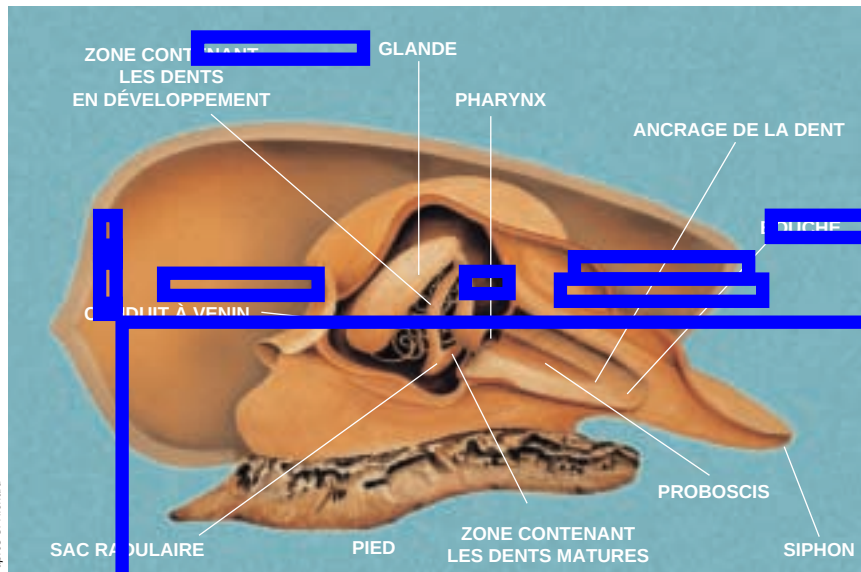
leur permet de capturer leur proie, en projetant une dent, laquelle injecte le venin. Classés en trois groupes, ils sont soit piscivores (une cinquantaine d'espèces), soit malacophages, se nourrissant exclusivement de mollusques (une cinquantaine d'espèces également), soit vermivores (ils se nourrissent de vers) ; avec plus de

1. LES CÔNES sont de diverses tailles (de quelques millimètres à plus de 20 centimètres) ; leur coquille peut être conique, bi-conique, cylindro-conique, bulbeuse, cylindrique, et présente une grande variété de colorations selon les espèces. Elle est formée de 5 à plus de 10 tours de spires calcaires à enroulement dextral autour d'un axe central. L'ouverture de la coquille est longue, tantôt étroite (*Conus excelsus*), tantôt évasée vers l'avant (*Conus geographus* et *Conus tulipa*). Sur la page de gauche sont présentés des spécimens conservés au Muséum national d'histoire naturelle : *Conus gloriamaris* (1), *Conus textile* (2), *Conus generalis* (3), *Conus dusaveli* (4), *Conus imperialis* (5), *Conus bangalensis* (6), *Conus quercinus* (7), *Conus geographus* (8), *Conus excelsus* (9), *Conus tulipa* (10), *Conus marmoreus* (11), *Conus striatus* (12 et 14), *Conus milneedwardsi* (13) et *Conus ammiralis* (15).

Ces espèces, comme toutes les espèces de cônes, sont de redoutables prédateurs qui utilisent un appareil venimeux perfectionné pour capturer leurs proies. Certains d'entre eux se nourrissent de petits poissons et utilisent la technique de « pêche au harpon » (ci-contre : un spécimen de *Conus consors* (a), à l'aquarium de La Rochelle, a repéré une proie et allonge son proboscis (b), situé sous le siphon proéminent. Le proboscis porte, à son extrémité, une dent radulaire, qui va lui servir de harpon. *Conus consors* s'est rapproché de quelques centimètres de sa proie ; il la harponne à l'aide de la dent qui sert également à injecter le venin. Le poisson se débat, mais il ne pourra pas s'échapper (c).

Conus consors attire sa prise vers sa bouche et l'ingère en quelques secondes (d). Ce cône utilise un arsenal de toxines qui, dans un premier temps, tétanisent la proie : les nageoires du poisson se figent dès l'injection du venin (c).





2. L'APPAREIL VENIMEUX des cônes est constitué de quatre organes principaux : la glande, le conduit à venin, le sac radulaire et le complexe pharynx-proboscis. La glande fonctionne vraisemblablement comme une pompe, favorisant, par ses contractions, l'écoulement du venin dans la dent radulaire. Le conduit à venin, élaborant la sécrétion venimeuse, est un long tube pelotonné. Les dents radulaires sont stockées dans le sac radulaire qui contient un paquet de plusieurs dizaines de dents disposées en deux rangées parallèles. Les dents se forment dans la branche la plus longue, puis migrent à travers différents stades de leur développement. Elles sont d'abord très flexibles, puis durcissent lors de leur migration vers la branche la plus courte. Cette autre branche débouche dans le pharynx en avant du conduit à venin ; elle contient les dents achevées dont la pointe est dirigée vers l'ouverture du pharynx. Au début de la capture, une dent se remplit de venin lorsqu'elle passe dans le pharynx ; le proboscis s'en saisit.

500 espèces, les vermivores sont les plus abondants.

L'appareil venimeux des cônes se compose d'une glande qui se prolonge par un long canal, le conduit à venin. Ce conduit et le sac radulaire débouchent dans le pharynx. Le sac radulaire contient les dents radulaires à différents stades de leur développement. Le proboscis, un organe de quelques millimètres au repos, prolonge le pharynx. Il est entouré de la bouche, encadrée par deux tentacules portant chacun un œil à l'extrémité d'un pédoncule.

Quand l'animal veut capturer une proie, une dent radulaire se place dans le pharynx. La glande se contracte, et le venin emplit la dent. Le proboscis s'invagine pour la saisir et l'ancrer à son extrémité. Il s'allonge considérablement et, au moment opportun, il est brusquement et violemment projeté pour enfoncer la dent dans la proie. Le liquide venimeux contenu dans la dent s'écoule dans les tissus de la proie.

Cette dent reste plantée dans la proie et n'est pas récupérée par l'animal ; elle sera remplacée par une autre dent dans le pharynx. La proie est ingérée par la bouche qui s'élargit notablement. Toutes les espèces de cônes utilisent ce système d'envenimation, mais, comme

nous le verrons, les stratégies d'envenimation et la morphologie des dents varient selon les espèces.

Les cônes utilisent également leur appareil venimeux à des fins défensives. Ils sont tous dangereux pour l'homme, seule la piqûre de certains d'entre eux déclenche de vives douleurs et entraîne, parfois, la mort. Les envenimations sont plus ou moins graves selon l'espèce du cône et la quantité de venin injectée. Tous les cônes piscivores sont une menace pour l'homme, car leurs toxines sont actives sur les vertébrés. *Conus geographus* est l'espèce la plus dangereuse, infligeant des piqûres mortelles. Un autre cône, *Conus textile*, bien qu'il se nourrisse de mollusques, est parfois dangereux : dès 1705, le naturaliste hollandais Rumphius signale le décès d'une indigène de l'île de Banda, dans l'archipel des Moluques à la suite d'une piqûre par un spécimen de ce cône. Certains cônes vermivores, notamment les plus grands d'entre eux, représentent un danger par la quantité de venin injectée. Les réactions ne sont, généralement, que des inflammations. Des petits cônes vermivores, tel que *Conus pulicarius*, font des piqûres nécosantes comparables à celles des abeilles.

Un médecin de Ponérihoun, en Nouvelle-Calédonie, raconte que, «le 16 septembre 1963, vers 11 heures 30, une fillette âgée de neuf ans, en parfaite santé, pêchait des coquillages en compagnie de deux camarades sur le récif situé au niveau de la tribu de Paama-Poindimie. Alors qu'elle avait ramassé un *Conus geographus*, elle ressentit une douleur assez vive au niveau de la main. Elle jeta le coquillage, avisant ses camarades qu'elle venait d'être piquée. Immédiatement elle présenta aux points de la piqûre une macule érythémateuse accompagnée d'un léger œdème et, après quelques minutes, une syncope de courte durée, suivie de phases de convulsions avec des secousses musculaires très importantes. La mort survint environ 40 minutes après la piqûre». L'examen de la victime n'a rien révélé de particulier, si ce n'est l'existence de trois petites tâches noires à l'endroit de la piqûre».

Les stratégies d'envenimation

Avec Jean-Louis Menou et Pierre Laboue, plongeurs de l'IRD et de la Marine nationale, nous avons observé, aux îles Chesterfield, entre l'Australie et la Nouvelle-Calédonie, le comportement de certaines cônes piscivores, malacophages et vermivores. Les plongées ont le plus souvent lieu à la tombée de la nuit, moment choisi par les mollusques pour chasser.

Il suffit de quelques secondes à *Conus omors*, une espèce piscivore, enfouie sous le sable, pour repérer sa proie, déployer son proboscis, armer une dent radulaire, projeter son proboscis, enfoncer la dent dans la proie et la gobée ; la digestion durera plusieurs heures. Dès 1956, Alan Kohn, de l'Université de Washington, avait décrit la stratégie utilisée par *Conus striatus* et *Conus magus*, la même que celle de *Conus omors*. Tous ces cônes qui paralysent leurs proies avant de les ingérer utilisent la «pêche au harpon».

Conus geographus, une autre espèce piscivore, a adopté une tout autre stratégie : ce cône ouvre sa bouche, dont le diamètre atteint plusieurs centimètres, et l'usage d'un fil pour piéger un ou plusieurs poissons. Le cône n'envenime les poissons qu'après les avoir capturés. Cette stratégie, également utilisée par *Conus tulipa*, est nommée la «pêche au filet». Nous avons aussi observé le comportement

de *Conus textile*, un cône qui se nourrit essentiellement de strombes, des mollusques sauteurs. Après avoir injecté une première dent radulaire dans le pied de la proie, le cône la libère de l'extrémité de son proboscis et en injecte une autre, quelques secondes après. Ce procédé est répété plusieurs fois jusqu'à ce que le strombe soit paralysé. Les cônes vermivores utilisent également plusieurs dents radulaires pour lacérer les vers et les couper en morceaux ce qui en facilite l'ingestion.

Ces différentes stratégies d'envenimation nous ont conduits à étudier la morphologie des dents radulaires et leurs fonctions. Quel que soit le régime alimentaire, elles transpercent la proie et injectent le venin dans la plaie. Toutefois, la morphologie des dents radulaires est liée au régime alimentaire et à la stratégie d'envenimation adoptée. Les dents des cônes qui pêchent au harpon sont caractérisées par la présence d'un long harpon dont l'extrémité est incurvée ; après s'être ancrées dans les tissus de la proie, elles permettent aux cônes d'injecter le venin et de rapporter la proie vers la bouche.

Contrairement aux serpents, les cônes se déplacent lentement sur leur terrain de chasse. Malgré ce handicap, certains d'entre eux se nourrissent exclusivement de petits poissons qu'ils chassent à l'affût. La principale fonction du venin des cônes piscivores est donc d'immobiliser la proie. De même, le venin des cônes malacophages paralyse le pied des mollusques avant qu'ils ne se rétractent dans leur coquille. Cette nécessité d'immobiliser une proie a favorisé, au cours de l'évolution, la sélection de petites protéines (des peptides de 10 à 40 acides aminés), les conotoxines, qui agissent sur le système nerveux central et/ou périphérique. Le succès de la prélation est assuré, comme nous allons l'expliquer, par la combinaison de plusieurs conotoxines.

Les jonctions neuromusculaires, les zones de contact entre les ramifications des nerfs et les fibres musculaires sont les cibles les plus vulnérables et les plus exposées aux venins de cônes. Elles forment des synapses dont

la terminaison nerveuse est l'élément présynaptique et la fibre musculaire l'élément postsynaptique (voir la figure 4). La plupart des conotoxines perturbent la transmission neuromusculaire en agissant sur la terminaison nerveuse ou sur la fibre musculaire.

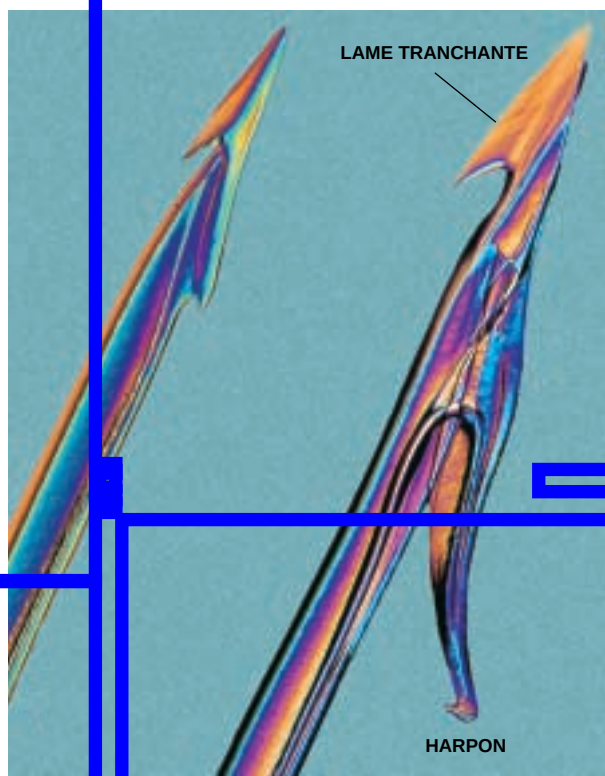
Pêche au harpon et paralysie rigide

Lorsqu'un influx nerveux (potentiel d'action) propagé par un axone arrive à la terminaison nerveuse, celle-ci se dépolarise (une dépolarisation est une perturbation de la différence de potentiel qui résulte de part et d'autre de la membrane cellulaire). Cette dépolarisation entraîne l'ouverture transitoire des canaux calcium présynaptiques. L'entrée d'ions calcium dans la terminaison déclenche l'arrimage, puis la fusion, des vésicules contenant de l'acétylcholine (un neuromédiateur) avec la membrane présynaptique. De l'acétylcholine est libérée dans la fente synaptique, et certaines molécules se fixent

sur leurs récepteurs localisés sur la fibre musculaire. Ces récepteurs-canaux sont aussi nommés récepteurs nicotiniques, car la nicotine s'y fixe également. Cette interaction entraîne un changement de conformation de ces récepteurs, qui s'ouvrent, laissant passer simultanément des ions sodium et potassium et, dans une moindre mesure, des ions calcium. Le changement de conductance électrique qui en résulte provoque une dépolarisation locale ; lorsque le seuil d'excitabilité électrique de la fibre musculaire est atteint, des canaux ioniques, localisés sur le muscle squelettique, s'ouvrent. Cette ouverture engendre un potentiel d'action qui se propage le long de la fibre musculaire et active la machinerie de la contraction (voir la figure 4). L'ouverture des canaux ioniques conduit à la transmission neuromusculaire est transitoire ; ainsi, un potentiel d'action qui se propage le long d'un axone donne une seule contraction musculaire.

Baldomero Olivera, de l'Université de l'Utah, a montré que le venin du cône *Conus purpurascens*, un cône qui pêche au harpon, déclenche deux symptômes lorsqu'il est injecté à un poisson : une paralysie rigide et une paralysie flasque. Le premier effet physiologique, la paralysie rigide, encore nommée choc excitotoxique, se caractérise par une tétanie et est assuré par la combinaison d'au moins deux conotoxines, la δ -P₆A et la κ -P₇A. La première (δ -P₆A) agit sur les canaux sodium et la seconde (κ -P₇A) sur les canaux potassium.

La conotoxine δ -P₆A se fixe sur les canaux sodium présynaptiques et en empêche la fermeture. À la jonction neuromusculaire, cette action se manifeste par une forte entrée d'ions sodium dans la terminaison et, par conséquent, par une dépolarisation prolongée de la membrane présynaptique, c'est-à-dire par une augmentation de l'excitabilité membranaire. Or, c'est une dépolarisation de la terminaison nerveuse qui aboutit à l'ouverture des canaux calcium déclenchant la cascade des événements qui aboutissent à la contraction musculaire. La dépolarisation maintenue, sous



3. LES DENTS RADULAIRES sont creuses et ouvertes à leurs deux extrémités, ce qui permet au venin de s'y accumuler et de s'écouler dans la plaie. Longues de quelques dixièmes de millimètre à plus de 20 millimètres, ces dents lacèrent les proies avec la lame tranchante de leur sommet. Elles sont maintenues à l'extrémité du proboscis pendant que la proie est transpercée et ingérée. Les dents radulaires des espèces vermivores et malacophages (par exemple, celles de *Conus textile*, à gauche) sont moins élaborées que celles des espèces piscivores qui « pêchent au harpon », tel *Conus striatus* : leurs dents (à droite) sont pourvues d'un long harpon dont l'extrémité peut être incurvée.

l'action de la δ -P₆A, se traduit par des contractions répétées du muscle. Selon B. Olivera, la κ -P₆A agit en synergie avec la δ -P₆A : une combinaison d'une entrée prolongée d'ions sodium et d'un blocage de la sortie des ions potassium se manifeste par une forte dépolarisation de la membrane des cellules excitables. Cela aboutit à des contractions musculaires répétées qui provoquent une tétanie (paralysie rigide) de la proie.

La paralysie flasque

Le deuxième symptôme provoqué par l'injection du venin de *Conus purpurascens* se caractérise par une paralysie flasque du poisson. Au moins trois toxines agissent en synergie pour bloquer la transmission neuromusculaire : l' α A-P₄A et la ψ -P₃E, qui bloquent toutes les deux des récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine, et la μ -P₃A, qui bloque les canaux sodium du muscle squelettique. Dans ce cas, les toxines n'agissent plus sur les terminaisons nerveuses (présynaptiques), mais sur les fibres musculaires (postsynaptiques). En empêchant l'acétylcholine de se fixer sur ses récepteurs, les toxines α A-P₄A et ψ -P₃E bloquent la transmission neuromusculaire. Quant à la μ -P₃A, elle inhibe les canaux sodium, bloquant ainsi directement l'émission des potentiels d'action musculaire. Ainsi, l'action simultanée de ces toxines se traduit par un blocage de la contraction musculaire, qui se caractérise par une paralysie flasque.

Comme *Conus purpurascens*, *Conus consors* utilise la technique de la pêche au harpon. Avec l'équipe de Jordi Molgo, au laboratoire de neurobiologie cellulaire et moléculaire du CNRS, à Gif-sur-Yvette, nous avons montré que, dans le venin de *Conus consors*, il existe deux familles de conotoxines : l'une agit au niveau présynaptique en augmentant l'excitabilité des terminaisons nerveuses (l'action se traduit par un choc excitotoxique), et l'autre inhibe la transmission neuromusculaire (il en résulte une paralysie flasque).

À La Rochelle, dans le Laboratoire de synthèses et études des substances naturelles et activités biologiques, le SESNAB, dirigé par Yves Letourneux, nous avons alors isolé, à partir du venin brut de *Conus consors*, trois nouvelles conotoxines : la CcTx, la α -Cn₁A et la α -Cn₁B. La CcTx semble activer sélectivement les canaux sodium de la ter-

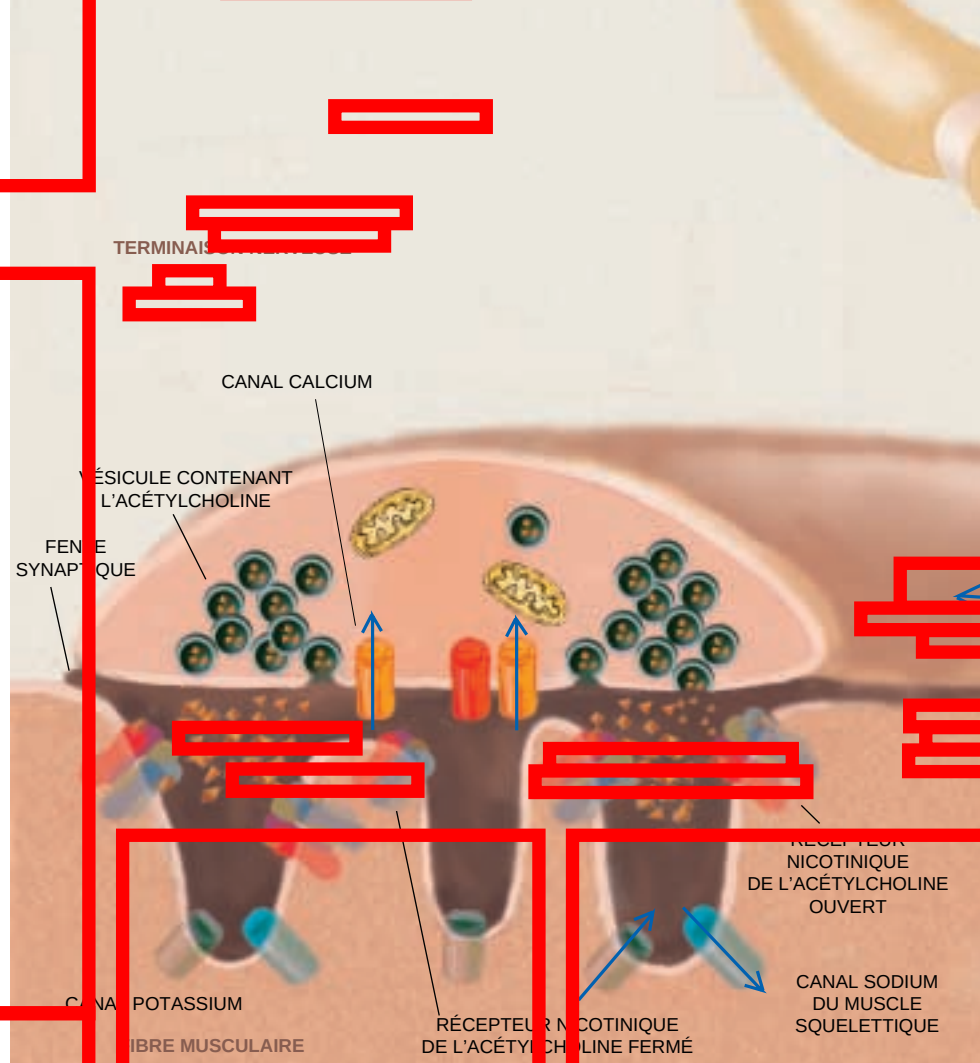
minaison, ce qui, par une entrée massive d'ions sodium, augmente l'excitabilité nerveuse. Cette toxine est responsable, du moins en partie, du choc excitotoxique provoqué par le venin brut de *Conus consors* (qui se manifeste par la tétanie des nageoires). Les deux conotoxines α -Cn₁A et α -Cn₁B bloquent les récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine et participent ainsi à l'inhibition de la transmission neuromusculaire. Ainsi, *Conus consors* et *Conus purpurascens* utilisent deux groupes de toxines. Le premier agit rapidement et tétanise la proie : le poisson est immobilisé jusqu'à l'entrée en action d'un autre groupe de conotoxines qui bloque la transmission neuromusculaire. Par cette « stratégie pharmacologique » et la morphologie élaborée de leurs dents, ces cônes optimisent leurs chances d'immobiliser leurs proies.

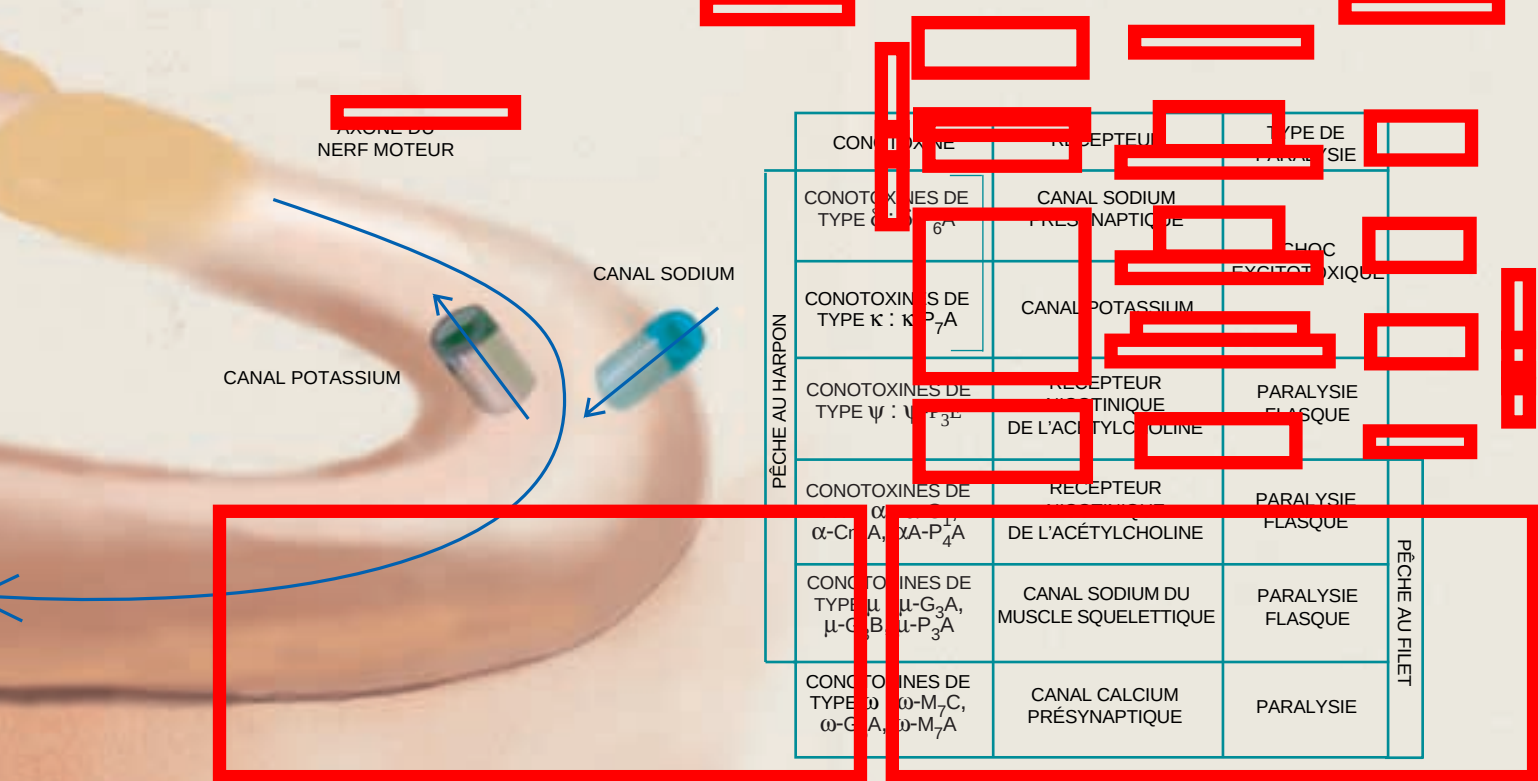
La pêche au filet

Le cône le plus étudié, et aussi le plus dangereux, est *Conus geographus* qui a adopté la stratégie de la pêche au filet et non pas celle du harpon. Les premières études de toxicité de son venin

ont été entreprises dès 1962 par R. Enders de l'Université de Queensland, en Australie, mais ce n'est qu'en 1978 que l'équipe de B. Olivera a isolé la première conotoxine de type α , l' α -G₁. En plus de cette toxine, *Conus geographus* en utilise deux autres (α -G₁A et α -G₂), trois conotoxines de type μ (μ -G₃A, μ -G₃B et μ -G₃C), qui bloquent sélectivement les canaux sodium du muscle squelettique, et une conotoxine de type ω (ω -G₆A) qui inhibe les canaux calcium présynaptiques. Cette dernière conotoxine empêche donc la libération d'acétylcholine qui se produit, normalement, après l'entrée d'ions calcium. Ces conotoxines agissent en synergie afin de bloquer la transmission neuromusculaire.

La stratégie de *Conus geographus*, qui ne paralyse ses proies qu'après les avoir piégées par la bouche, ne nécessite pas de toxines telles que δ -P₆A, κ -P₆A ou CcTx. En revanche, l'équipe de B. Olivera a récemment identifié dans le venin de *Conus geographus* trois autres toxines qui agissent spécifiquement sur le système nerveux central, et non pas sur la jonction neuromusculaire : la σ -G₆A, la conantokine-G et la contulakine-G.





4. UNE JONCTION NEUROMUSCULAIRE est une zone de contact entre les ramifications d'un nerf moteur et une fibre musculaire. C'est une cible privilégiée des conotoxines. L'arrivée d'un influx nerveux (ou potentiel d'action) provenant de l'axone d'un nerf moteur provoque une dépolarisation (une variation de la différence de potentiel membranaire) ; les canaux calcium s'ouvrent et des ions calcium pénètrent dans la terminaison présynaptique. Les vésicules contenant l'acétylcholine fusionnent avec la membrane et leur contenu se déverse dans la fente synaptique. Quelques molécules de ce neurotransmetteur se fixent sur leurs récepteurs nicotiniques du muscle squelettique, qui changent de conformation et s'ouvrent, laissant passer

des ions. Cette dépolarisation locale atteint le seuil d'excitabilité de la fibre et engendre un potentiel d'action musculaire qui active la machinerie de la contraction. Normalement, l'ouverture des canaux ioniques (pré- et postsynaptiques) est transitoire : à un potentiel d'action correspond une seule contraction de la fibre musculaire. La plupart des conotoxines perturbent le fonctionnement de ces canaux. Certaines empêchent la fermeture des canaux ioniques présynaptiques (sodium), de sorte que les contractions persistent, créant une paralysie rigide nommée choc excitotoxique. D'autres conotoxines agissent sur les canaux ioniques postsynaptiques et bloquent la transmission neuromusculaire, ce qui provoque une paralysie flasque.

La σ -G₁A est la première toxine peptidique connue qui inactive sélectivement le récepteur 5-HT₃ ouvert par la sérotonine. Les conantokines, isolées des venins de *Conus geographus* (conantokine-G) et de *Conus tulipa* (conantokine-T), bloquent le récepteur NMDA du glutamate, inhibant ainsi l'influx d'ions calcium dans les neurones du système nerveux central et, par conséquent, la transmission des messages nerveux. Ces trois toxines inhiberaient le «circuit sensoriel» des poissons, les plongeant dans un «état de sédation». Les poissons, piégés par la bouche de *Conus geographus*, seraient dans un état léthargique avant même d'être paralysés par les conotoxines de type α , ω ou μ .

Séquences hypervariables et structures conservées

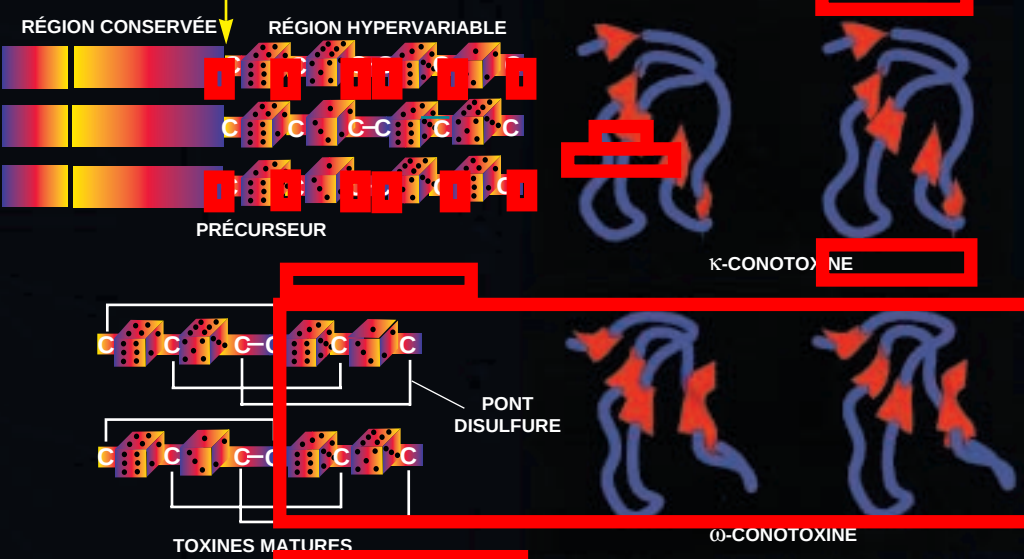
La centaine de conotoxines identifiées montre que les venins d'espèces différentes sont composés de toxines dont les séquences divergent. Cette divergence est également observée pour plusieurs conotoxines qui ont la même cible physiologique. Ainsi, les conotoxines α -G₁, α -A-P₄A et la ψ -P₃E qui toutes

bloquent les récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine de la jonction neuromusculaire ont des séquences très différentes. Il en va de même pour les ω -G₆A et ω -M₇A qui agissent sur le même sous-type de canaux calcium.

Quelle est l'origine de cette hypervariabilité ? L'analyse des ARN messagers de ces peptides (les gènes sont transcrits en ARN messagers, eux-mêmes traduits en protéines) a montré qu'ils sont dans un premier temps traduits en précurseurs de 70 à 80 acides aminés, ayant trois régions distinctes : la séquence signal, la région propeptide et une région correspondant à une copie de la toxine. La comparaison des séquences des précurseurs des ω -G₆A et ω -M₇A a montré que la partie N-terminale (correspondant à la séquence signal) est quasi identique, tandis que la partie C-terminale (aboutissant à la toxine mature) est très variable, les résidus de cystéine étant conservés (voir la figure 5). La cystéine est un acide aminé, et la plupart des conotoxines en contiennent plusieurs. Ces résidus, en se liant par des ponts disulfure (entre atomes de soufre), guident le repliement des conotoxines et leur confèrent

leur structure tridimensionnelle biologique active. Par un mécanisme génétique spécialisé, les cônes introduisent de nouvelles séquences spécifiques entre les résidus cystéine. Ces hypermutations permettent la formation de nouvelles conotoxines aux fonctions biologiques très variées, à partir d'un même motif cystéine. Aujourd'hui, on connaît cinq familles de conotoxines ayant le même motif cystéine (C-C-CC-C-C) et des acides aminés inter-cystéine hypervariables et dont le précurseur a une séquence signal conservée. Ces toxines sont actives sur trois types de canaux ioniques : les canaux potassium, calcium et sodium.

De plus, l'équipe d'André Menez, au département d'ingénierie et d'études des protéines, au Centre d'études nucléaires de Saclay, a récemment montré que plusieurs de ces conotoxines (ω -G₆A, ω -M₇A et κ -P₇A) ont une structure tridimensionnelle similaire (voir la figure 5). Cette «stratégie biochimique» assure ainsi aux cônes un arsenal de toxines aux structures similaires et dont les actions physiologiques sont très variées.



5. LE PRÉCURSEUR DES CONOTOXINES est constitué d'une région conservée et d'une autre qui correspond à la séquence des toxines. Ces dernières renferment un arrangement d'acides aminés cystéine conservé (C-C-C-C-C-C) et des séquences d'acides aminés (symbolisées par les dés) «hypervariables». Les toxines matures sont obtenues après coupure du précurseur (à l'endroit de la flèche). Elles se replient alors par formation de ponts disulfure, qui s'établissent entre atomes de soufre des résidus cystéine (traits blancs, en bas, à gauche). On observe la structure tridimensionnelle de deux familles de conotoxines sur les images stéréographiques (à droite) ; pour les visualiser, on doit approcher la revue des yeux sans essayer d'accommoder puis la reculer lentement, sans jamais chercher à obtenir une image nette.

Les applications thérapeutiques

Beaucoup de substances naturelles sont potentiellement utilisables comme agents thérapeutiques, mais la plupart d'entre elles n'ont pas une spécificité suffisante pour leur récepteur cible ; ce manque de spécificité est responsable d'effets secondaires indésirables. Les pharmacologues recherchent de nouvelles substances plus spécifiques. Dans ce contexte, les peptides des venins de cônes, parce qu'ils ont cette propriété, permettent l'étude de récepteurs et de canaux ioniques, cibles potentielles dans le traitement de nombreuses pathologies.

La plupart des conotoxines agissant sur le récepteur nicotinique empêchent l'acétylcholine de se lier à l'un ou l'autre des deux sites récepteurs de l'acétylcholine. Ce récepteur est constitué de cinq sous-unités qui forment un canal ; les sites de liaison du neurotransmetteur sont localisés aux interfaces des sous-unités α/γ , et α/δ . Lorsque deux molécules de neurotransmetteur se fixent sur ces sites, la protéine-canal change de conformation et s'ouvre. La spécificité d'interaction des conotoxines avec le récepteur nicotinique est illustrée par la conotoxine α -G₁ qui se lie uniquement sur le site récepteur situé à l'interface des sous-unités α et γ du récepteur nicotinique du muscle squelettique.

De surcroît, certaines conotoxines agissent sélectivement et avec une forte

affinité sur les récepteurs nicotiniques neuronaux de l'acétylcholine, récepteurs constitués de sous-unités différentes de celles des récepteurs du muscle squelettique. Un autre exemple est celui des conotoxines de type μ . Ainsi, le μ -G₃A bloque spécifiquement les canaux sodium du muscle squelettique sans aucune affinité pour ceux du système nerveux central. Au contraire, le μ -P₃A, qui a le même motif cystéine, inhibe aussi les canaux sodium de neurones de rat. Ainsi, ces deux conotoxines de type μ sont des outils de choix pour les biologistes qui étudient la pharmacologie des différents types de canaux sodium. De la même façon, les ω -conotoxines qui sont spécifiques de certains types de canaux calcium ont été largement utilisées pour la caractérisation des fonctions physiologiques de ces canaux.

Frédéric LE GALL, docteur en neurobiologie, travaille au Laboratoire de neurobiologie cellulaire et moléculaire du CNRS, à Gif-sur-Yvette. Philippe FAVREAU travaille au Laboratoire de synthèses et études des substances naturelles à activités biologiques de l'Université de La Rochelle, où Georges RICHARD est professeur au Laboratoire de biologie et environnement marins.

B.M. OLIVERA, *Conus Venom Peptides, Receptors and Ion Channel Targets and Drug Design : 50 Millions Years of Neuropharmacology*, in *Molecular Biology of the Cell*, vol. 8, pp. 2101-2109, 1997.

Parce qu'elles sont très spécifiques, ces ω -conotoxines ont des applications thérapeutiques. Ainsi, l'accumulation excessive de calcium intracellulaire est en partie responsable de la dégénérescence neuronale après une ischémie cérébrale (une insuffisance d'oxygénation après un accident vasculaire cérébral notamment). Certaines conotoxines de type ω , en inhibant des canaux calcium, sont efficaces sur des modèles expérimentaux d'ischémie chez l'animal : la conotoxine ω -M₇A prévient la destruction des neurones, même quand elle est injectée plusieurs heures après un choc ischémique provoqué.

Par ailleurs, ces canaux calcium sont abondants dans la moelle épinière, là où arrivent les terminaisons des fibres nociceptives (les fibres nerveuses associées à la douleur). L'administration, dans la moelle épinière de rat, de la conotoxine ω -M₇A supprime la douleur (l'effet observé est proportionnel à la dose administrée). Son efficacité est notablement supérieure à celle des opioïdes et la tolérance vis-à-vis de la conotoxine ω -M₇A n'augmente pas. Des tests cliniques sur l'homme ont été entrepris aux États-Unis : l'activité analgésique de cette conotoxine ne s'accompagne pas d'effets secondaires indésirables. La conotoxine ω -M₇A est la première molécule issue des venins de cônes à entrer dans la dernière phase d'essais cliniques. D'autres peptides de venins de cônes, également à l'étude, inhibent les convulsions qui accompagnent les crises d'épilepsie : c'est le cas des conotoxines spécifiques des récepteurs NMDA du glutamate.

Six cents espèces de Conidae, une centaine de peptides par espèce : une multitude de substances thérapeutiques potentielles !

F. LE GALL et al., *The Strategy Used by some Piscivorous Cone Snails to Capture their Prey : the Effects of their Venoms on Vertebrates and on Isolated Neuromuscular Preparations*, in *Toxicon* n° 17, vol. 7, pp. 985-998, 1999.

P. FAVREAU et al., *Biochemical Characterization and NMR Structure of Novel Conotoxins Isolated from the Venom of Conus Consors*, in *Biochemistry*, n° 38, vol. 19, pp. 6317-6326, 1999.

F. LE GALL et al., *A new Conotoxin Isolated from Conus Consors Venom that Discriminates between Nerve and Muscle Voltage-Gated Sodium Channels*, in *European Journal of Neuroscience*, 1999 (à paraître).

Lady Ada et le premier ordinateur

EUGENE ERIC KIM • BETTY ALEXANDRA TOOLE

La collaboration entre Ada King, comtesse de Lovelace, et le pionnier de l'informatique Charles Babbage a conduit à une publication qui fit date sur la manière de programmer le premier ordinateur automatique.

Augusta Ada King avait un père que l'on disait «fou et méchant» : cet excentrique n'était autre que le poète lord Byron. Ada avait hérité de son célèbre père son goût pour le langage et son appétit de vivre. C'était une femme belle, charmeuse et aristocratique, qui décéda à 36 ans, exactement au même âge que son père. Tout comme Byron, Ada est surtout connue pour ses écrits.

En 1843, elle publie un ensemble de notes qui décrivent la Machine analytique de Charles Babbage, le premier ordinateur universel de l'histoire jamais conçu. Cette machine ne fut jamais construite principalement parce que Babbage ne put rassembler les fonds nécessaires, mais les notes d'Ada contiennent un programme destiné à calculer, sur cette machine, une série de nombres nommés nombres de Bernoulli (voir l'encadré de la page 65).

Les notes d'Ada, sa vie et son rôle de pionnière dans un domaine où les femmes ont été notoirement sous-représentées ont fait une figure emblématique. De nombreuses biographies lui ont été consacrées, et elle a inspiré des pièces de théâtre et des romans écrits par des sommets comme Tom Stoppard ou Arthur Clarke. En 1997, la réalisatrice Lynn Hershman Leeson a fondé un film, *Conceiving Ada* («Concevoir Ada») sur sa vie. Maintes femmes ont contribué aux progrès de l'informatique, mais Ada est la seule qui ait donné son nom à un langage de programmation, encore très utilisé dans l'aérospatiale.

Le véritable rôle d'Ada aux origines de l'informatique est controversé. Nombre d'historiens affirment à tort

qu'Ada fut le premier programmeur de l'histoire, alors que c'est Babbage qui a écrit les premiers programmes pour sa Machine analytique, même si la plupart n'ont jamais été publiés. D'autres contestent injustement qu'Ada soit l'auteur du programme inclus dans ses notes, voire des notes elles-mêmes.

La vérité se situe vraisemblablement entre ces extrêmes. Babbage disait qu'Ada était son «interprète». Il a discuté des notes avec Ada et revise les premières versions, mais Ada est elle-même l'auteur des notes. Ces, les travaux pionniers de Babbage constituaient le fondement des notes d'Ada et de sa pensée, mais ces écrits lucides révélaient une compréhension unique de la signification et des possibilités de la Machine analytique.

Une jeune mathématicienne

Augusta Ada Byron naît le 10 décembre 1815 à Londres. Elle est la fille de lord Byron et de la femme qu'il avait épousé 11 mois auparavant, la mathématicienne Annabella Milbanke. Lors de la naissance de sa fille, Annabella regrette déjà son mariage : des rumeurs qui font état d'une liaison de Byron avec sa demi-sœur poussent Annabella à se séparer du poète. Ce dernier quitte l'Angleterre en avril 1816 ; il ne reverra jamais sa fille.

Lady Byron élève Ada pour en faire une mathématicienne et une scientifique. Elle décourage son penchant pour la littérature, en partie pour l'éloigner de son père. Ada reçoit une excellente éducation : ses professeurs de mathématiques sont Mary Somerville,

connue pour ses traductions des œuvres de Pierre-Simon Laplace, et le logicien Augustus De Morgan.

Cette formation en mathématiques est inhabituelle pour l'époque, même dans la noblesse. Alors que les mathématiques sont florissantes en Europe continentale, dans la première moitié du XIX^e siècle, les mathématiques britanniques stagnent. De Morgan, George Peacock et leur ami d'enfance Charles Babbage contribuent à régénérer les mathématiques britanniques, mais le niveau de formation des jeunes, notamment celui des jeunes filles, reste limité. Néanmoins, grâce à De Morgan, Ada reçoit de solides notions d'algèbre, de logique et d'analyse.

Le 3 juin 1833, Ada, âgée de 17 ans, se rend à une réception où elle rencontre Babbage. Celui-ci, âgé de 41 ans, est veuf et connu tant pour son activisme politique et ses idées scandaleuses que pour ses travaux en mathématiques et en économie. Quelques semaines après la rencontre, Babbage montre à Ada sa Machine à différences, l'une des premières calculatrices (voir *Le calculateur mécanique de Charles Babbage* par Doron Swade, in *Pour la Science*, avril 1993). La jeune fille est captivée. Pendant les années qui suivent, elle assiste de très près au développement de sa machine, lisant les rares articles publiés sur elle et discutant avec Babbage.

Babbage avait conçu la Machine à différences comme un générateur de tables mathématiques, en automatisant les étapes «mécaniques» du calcul. Bien qu'efficace, ses capacités étaient limitées : elle ne pouvait effectuer que des additions et des soustractions, et résoudre



1. AUGUSTA ADA KING, com-
tesse de Lovelace, a posé pour ce
portrait d'Alfred-Édouard Chalon vers
1838, quelques années après sa première
rencontre avec Charles Babbage. Le car-
touche montre un timbre émis en 1992
par la Poste britannique pour la com-
mémoration du 200^e anniversaire de la
naissance de Babbage. L'arrière-plan
représente des notes écrites par Ada,
comprénant un programme qu'elle a écrit
pour le calculateur de Babbage.

une série d'équations polynomiales (comme $0 = a + bx + cx^2 + dx^3 + \dots$).

Cependant, Babbage a réfléchi à un système plus ambitieux. Devenu l'ami d'Ada, il lui décrit les principes d'une nouvelle machine, la Machine analytique, beaucoup plus élaborée que la Machine à différences. Il passera les 38 années restantes de sa vie à en perfectionner les plans.

La collaboration avec Babbage

Babbage conçoit sa machine analytique de sorte qu'elle puisse résoudre n'importe quel problème arithmétique ;

l'architecture qu'il envisage ressemble beaucoup à celle des ordinateurs d'aujourd'hui, avec un «magasin» (une mémoire), un «moulin» (un processeur) et un lecteur de cartes perforées (une unité d'entrée). Babbage a pris l'idée des cartes perforées au métier à tisser de Jacquard, qui tisse des motifs automatiquement à l'aide de telles cartes. En sortie, la machine doit produire une page imprimée à partir des cartes perforées. La Machine analytique doit effectuer des additions, des

des divisions. Elle doit exécuter ou lire une liste d'instructions et le faire sous certaines conditions («si

x, alors y»), un concept fondamental de l'informatique nommé branchement conditionnel.

En 1840, Babbage fait sa première et unique présentation de la Machine analytique à un groupe de mathématiciens et d'ingénieurs à Turin. Parmi eux se trouve Luigi Federico Menabrea, un jeune mathématicien, qui deviendra premier ministre d'Italie. Très intéressé, celui-ci publie un article en français intitulé *Notions sur la machine analytique de Charles Babbage*.

L'article de Menabrea traite plutôt des principes mathématiques de la Machine à différences et de la Machine analytique que des opérations mécaniques sous-jacentes. Attentif à l'architecture de l'appareil, il reconnaît que la Machine analytique serait capable de calculer toute formule algébrique correctement exprimée (ou programmée) sur des cartes perforées. Menabrea écrit «Les cartes sont une simple traduction de formules algébriques, ou, pour être plus exact, une autre forme de notation analytique.»

Ada, qui a épousé William King, comte de Lovelace, lit l'article de Menabrea et commence à le traduire en anglais. Babbage est resté un bon ami et, ayant entendu parler de ses travaux au début de 1843, l'encourage à annoter la traduction.

Cette suggestion marque le début d'une collaboration qui mène à la publication par Ada du premier article traitant dans le détail de la programmation d'un calculateur ; ce sera le seul article de ce genre pour près d'un siècle. L'article, augmenté de sept notes (de A à G), est trois fois plus long que l'article initial de Menabrea. Ces notes sont en grande partie consacrées à la programmation de la Machine analytique à l'aide des cartes perforées de Jacquard. «La Machine analytique se distingue par l'application du principe que Jacquard a conçu pour régler, à l'aide de cartes perforées, les motifs les plus compliqués dans la fabrication de brocards. Nous disons, fort à propos, que la Machine analytique tisse des motifs algébriques, tout comme le métier à tisser de Jacquard tisse des fleurs et des feuilles.» Les cartes constituent une solution particulièrement ingénieuse pour tisser des étoffes, ou pour exécuter des calculs, car elles permettent d'engendrer automatiquement n'importe quel motif ou équation.

Ada affine ensuite les descriptions de Menabrea et décrit en détail les

Les nombres de Bernoulli

Les nombres de Bernoulli apparaissent quand on développe des fonctions trigonométriques en séries polynomiales. Ce sont les valeurs B_n dans le développement polynomial de l'expression :

$$\frac{x}{e^x - 1} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n x^n}{n!}$$

Pour son programme, Ada avait simplifié cette expression en :

$$0 = -\frac{1}{2} \frac{(2x-1)}{(2x+1)} + B_1 \frac{(2x-1)}{2!} + B_2 \frac{(2x-1)(2x-2)}{4!} + B_3 \frac{(2x-1)(2x-2)(2x-3)}{6!} + B_4 \frac{(2x-1)(2x-2)(2x-3)(2x-4)}{8!} + B_5 \frac{(2x-1)(2x-2)(2x-3)(2x-4)(2x-5)}{10!} + \dots$$

Pour calculer B_n à partir de cette expression, commençons par donner à x la valeur 1. La fraction $2x/2!$ associée à B_1 est alors égale à 1 et les fractions associées $B_2, B_3, \dots$ sont toutes égales à 0, car chacune d'elles contient le facteur $(2x-2)$ qui s'annule pour $x=1$. On obtient :

$$0 = \left(-\frac{1}{2} \times \frac{1}{3}\right) + B_1$$

Soit $B_1 = 1/6$. Si nous fixons maintenant x égal à 2, les fractions associées à $B_3, B_4, \dots$ s'annulent, car leur numérateur contient le facteur $(2x-4)$. On obtient :

$$0 = \left(-\frac{1}{2} \times \frac{3}{5}\right) + (B_1 \times 2) + B_2$$

Connaissant la valeur de B_1 , on calcule $B_2 = -1/30$. Ainsi, de proche en proche, on calcule les nombres de Bernoulli, dont les cinq premiers sont $1/6, -1/30, 1/42, -1/30$ et $5/66$.

Pour diverses raisons, les indices qu'Ada a utilisés dans son programme étaient tous des nombres impairs : $B_1, B_3, B_5, \dots$, et non $B_1, B_2, B_3, \dots$. Le calcul successif de chacun des nombres de Bernoulli s'effectue dans ce que les informaticiens modernes nomment une boucle. Pour calculer les valeurs des fractions associées à chaque nombre de Bernoulli, Ada utilise une seconde boucle. Elle commence par diviser le premier facteur du numérateur par le premier facteur du dénominateur et elle met cette valeur en mémoire. Elle divise ensuite le second facteur du numérateur par le second facteur du dénominateur et multiplie la valeur obtenue par la valeur précédemment mise en mémoire. Ces étapes sont répétées jusqu'à ce que la valeur de la fraction soit entièrement calculée, stade auquel elle est multipliée par le nombre de Bernoulli approprié.

particularités de programmation de la Machine analytique. Par exemple, elle souligne que la machine peut sélectionner les instructions selon certaines conditions, et elle distingue ce qui est théoriquement calculable de ce qui l'est en pratique. Une analyse également les avantages que représente la réutilisation possible du programme par la Machine analytique.

Enfin, Ada montre le ridicule de la notion de «machine pensante» par

analogie avec la pensée humaine : «La Machine analytique n'a aucune prétention de créer quoi que ce soit, elle peut exécuter tout ce que nous savons ordonner pour la faire fonctionner.» Plus d'un siècle après, lors officielle. Alan Turing nomme cette idée l'«Objection de lady Lovelace».

Le reste des notes est consacré aux principes de programmation de la Machine analytique ; il comprend

une description du mécanisme des cartes perforées et de la notation utilisée pour écrire les programmes. Une notation rigoureuse s'impose pour exprimer la formule algébrique sur les cartes perforées. Babbage avait adopté une proposition différente.

Ada termine ses notes par un programme de calcul des nombres de Bernoulli. Le mathématicien suisse Jacques Bernoulli avait décrit ces nombres dans

Ada calcule les nombres de Bernoulli

Le schéma ci-dessous est le programme avec lequel Ada calculait B_7 , le quatrième nombre de Bernoulli. Les six premières colonnes montrent les différentes opérations que réaliserait la Machine analytique, et les autres colonnes représentent les valeurs de chacune des variables. Chaque ligne correspond à une opération.

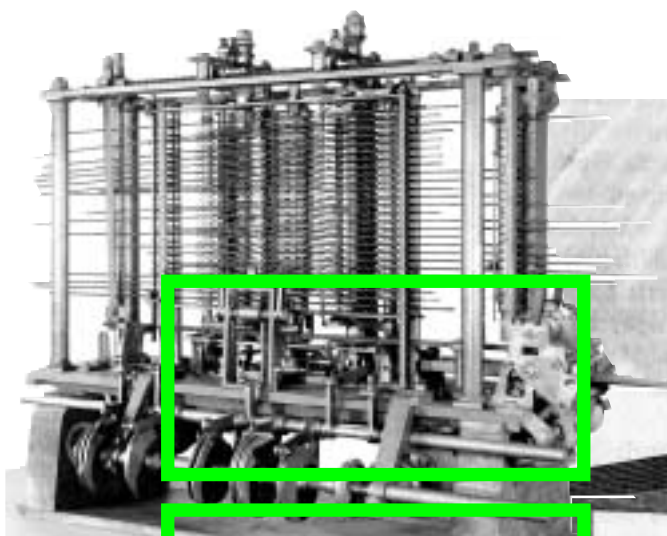
Lorsque le programme commence, il utilise six variables : V_2, V_3, V_{21}, V_{22} et V_{23} (cases foncées de la barre supérieure) ; les exposants, à gauche de ces nombres, indiquent le nombre de fois où la variable a été utilisée. Les valeurs de ces variables sont 1, 2, n (qui, dans ce cas, est 4, car Ada calcule B_7 , le quatrième nombre de Bernoulli), B_1, B_3 et B_5 . V_{10} est utilisé pour mettre en mémoire le nombre d'itérations restant à exécuter. À la première itération, V_{10} est égal à $n - 1$, à la seconde itération, V_{10} est égal à $n - 2$, et ainsi de suite. Lorsque V_{10} est égal à 1, la boucle s'arrête, et le programme a fini de calculer les nombres de Bernoulli.

Les six premières opérations calculent $(1/2) \times (2n-1)/(2n+1)$ et mettent la valeur en mémoire dans V_{13} . L'opération 7 soustrait 1 de n et assigne à V_{10} , car la première itération est terminée. Les opérations 8, 9 et 10 calculent $2n/2$ et le multiplient par B_1 , qui a été calculé précédemment et mis en mémoire dans V_{21} ; elles mettent la valeur en mémoire dans V_{12} . L'opération 11 prend V_{12} et l'ajoute à V_{10} , et l'opération 12 soustrait 2 de n et met cette valeur en mémoire dans V_{10} , car la seconde itération est terminée. Les opérations 13 à 21 calculent la valeur suivante et la multiplient par B_5 .

Le programme d'Ada est critiquable, car elle n'utilise pas de variable pour conserver la trace de chaque itération pendant le calcul des valeurs fractionnaires, comme elle le fait pour V_{10} lorsqu'elle calcule le produit des fractions par les précédents nombres de Bernoulli. On note également une erreur, dans le programme d'Ada, dans l'opération 21, où le troisième facteur du dénominateur devrait être 4 et non 3.

Diagram for the computation by the Engine of the Numbers of Bernoulli. See Note G. (page 722 et seq.)

Number of Operation.	Nature of Operation.	Variables acted upon.	Variables receiving results.	Indication of change in the value on any Variable.	Statement of Results.	Data.												Working Variables.												Result Variables.			
						V_1 0 0 1	V_2 0 0 2	V_3 0 0 4	V_4 0 0 0	V_5 0 0 0	V_6 0 0 0	V_7 0 0 0	V_8 0 0 0	V_9 0 0 0	V_{10} 0 0 0	V_{11} 0 0 0	V_{12} 0 0 0	V_{13} 0 0 0	V_{14} 0 0 0	V_{15} 0 0 0	V_{16} 0 0 0	V_{17} 0 0 0	V_{18} 0 0 0	V_{19} 0 0 0	V_{20} 0 0 0	V_{21} 0 0 0	V_{22} 0 0 0	V_{23} 0 0 0	V_{24} 0 0 0	V_{25} 0 0 0	V_{26} 0 0 0	V_{27} 0 0 0	
1	$\times$	$V_2 \times V_3$	V_6, V_7, V_8	$V_6 = V_2 \times V_3$ $V_7 = V_2 \times V_3$ $V_8 = V_2 \times V_3$	$= 2n$	...	2	n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	2n	
2	$-$	$V_4 - V_1$	V_6	$V_6 = V_4 - V_1$	$= 2n - 1$	...	1	...	2n - 1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
3	$+$	$V_6 + V_1$	V_6	$V_6 = V_6 + V_1$	$= 2n + 1$	...	1	...	2n + 1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
4	$+$	$V_6 + V_4$	V_{11}	$V_{11} = V_6 + V_4$	$= 2n - 1$	...	...	...	0	0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
5	$+$	$V_{11} + V_1$	V_{11}	$V_{11} = V_{11} + V_1$	$= 2n$	...	2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
6	$-$	$V_{11} - V_1$	V_{11}	$V_{11} = V_{11} - V_1$	$= 2n - 1$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
7	$-$	$V_3 - V_1$	V_{10}	$V_{10} = V_3 - V_1$	$= n - 1 (= 3)$	...	1	...	n	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
8	$+$	$V_2 + V_7$	V_7	$V_7 = V_2 + V_7$	$= 2 + 0 = 2$	...	2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
9	$+$	$V_6 + V_7$	V_{11}	$V_{11} = V_6 + V_7$	$= 2n = A_1$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
10	$\times$	$V_{11} \times V_{11}$	V_{12}	$V_{12} = V_{11} \times V_{11}$	$= B_1 \cdot \frac{2n}{2} = B_1 A_1$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
11	$+$	$V_{12} + V_{11}$	V_{12}	$V_{12} = V_{12} + V_{11}$	$= \frac{1}{2} \cdot \frac{2n-1}{2n+1} + B_1 \cdot \frac{2n}{2}$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
12	$-$	$V_{10} - V_1$	V_{10}	$V_{10} = V_{10} - V_1$	$= n - 2 (= 2)$	...	1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
13	$+$	$V_6 - V_1$	V_6	$V_6 = V_6 - V_1$	$= 2n - 1$	...	1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
14	$+$	$V_1 + V_7$	V_7	$V_7 = V_1 + V_7$	$= 2 + 1 = 3$	...	1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
15	$+$	$V_6 + V_7$	V_6	$V_6 = V_6 + V_7$	$= \frac{2n-1}{3}$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
16	$\times$	$V_6 \times V_{11}$	V_{11}	$V_{11} = V_6 \times V_{11}$	$= \frac{2n}{3} \cdot \frac{2n-1}{3}$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
17	$+$	$V_6 - V_1$	V_6	$V_6 = V_6 - V_1$	$= 2n - 2$	...	1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
18	$+$	$V_1 + V_7$	V_7	$V_7 = V_1 + V_7$	$= 3 + 1 = 4$	...	1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
19	$+$	$V_6 + V_7$	V_6	$V_6 = V_6 + V_7$	$= \frac{2n-2}{4}$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
20	$\times$	$V_6 \times V_{11}$	V_{11}	$V_{11} = V_6 \times V_{11}$	$= \frac{2n}{4} \cdot \frac{2n-1}{3} = A_1$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
21	$\times$	$V_{12} \times V_{11}$	V_{12}	$V_{12} = V_{12} \times V_{11}$	$= B_1 \cdot \frac{2n-1}{2} \cdot \frac{2n-2}{3} = B_1 A_1$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
22	$+$	$V_{12} + V_{11}$	V_{12}	$V_{12} = V_{12} + V_{11}$	$= A_1 + B_1 A_1 + B_3 A_3$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
23	$-$	$V_{10} - V_1$	V_{10}	$V_{10} = V_{10} - V_1$	$= n - 3 (= 1)$	...	1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
Here follows a repetition of Operations thirteen to twenty-three.																																	
24	$+$	$V_{12} + V_{11}$	V_{12}	$V_{12} = V_{12} + V_{11}$	$= B_7$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
25	$+$	$V_1 + V_7$	V_7	$V_7 = V_1 + V_7$	$= n + 1 = 4 + 1 = 5$ by a Variable-card. by a Variable-card.	...	1	...	n + 1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	



2. LA MACHINE ANALYTIQUE DE BABBAGE ne fut jamais terminée, mais une partie (ci-dessus) du «moulin» (l'unité centrale) et l'imprimante ont été assemblées peu avant sa mort en 1871. La machine devait être programmée à l'aide de cartes perforées, une idée reprise du métier à tisser de Jacquard (à droite).

un livre classique de probabilité, *Ars conjectandi* (*L'Art de la conjecture*), publié après sa mort, en 1713. Le programme de calcul de ces nombres illustre la capacité de branchement conditionnel de la Machine analytique et utilise deux boucles. Ce programme était beaucoup plus ambitieux et complexe que tous ceux que Babbage avait écrits.

Babbage et les notes

On connaît les travaux d'Ada grâce à sa correspondance avec Babbage, au cahier de Babbage, à l'autobiographie de ce dernier ainsi qu'aux notes d'Ada elles-mêmes. Parmi les lettres échangées entre Ada et Babbage qui nous sont parvenues, la plupart ont été écrites par Ada. Malheureusement, son carnet de notes est perdu ; il nous aurait éclairé sur sa démarche intellectuelle.

Ada rédige ses notes entre février et septembre 1843 ; elle en discute souvent avec Babbage, à la fois par lettre et de vive voix. Elle compte sur lui pour expliquer le fonctionnement interne de sa machine et pour confirmer la précision de ses descriptions, mais elle étonne souvent Babbage par sa perspicacité. Ayant lu un brouillon de la note A, par exemple, Babbage répond : «J'hésite beaucoup à vous retourner votre admiration et philosophique note A. Surtout ne la modifiez pas... Vous ne pouviez pas savoir tout cela par intuition et, plus je lis vos notes, plus elles me surprennent, et plus je regrette de ne pas avoir exploré plus tôt cette mine d'or.»

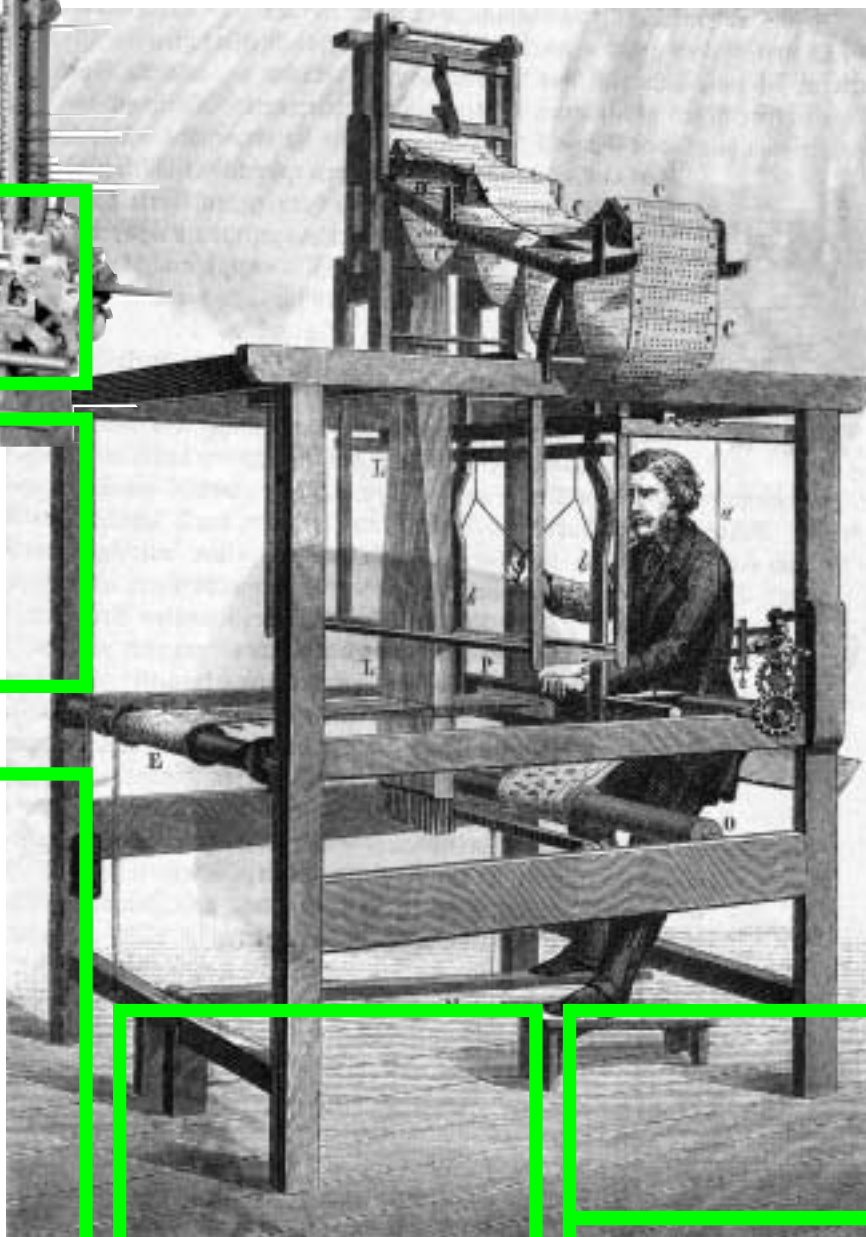
Si Ada demande l'avis de Babbage et est ouverte aux suggestions, elle refuse que Babbage transforme lui-même le texte. En août 1843, un mois avant que les versions finales partent chez l'imprimeur, Babbage propose d'inclure dans les notes une préface déplorant le manque de soutien du gouvernement britannique pour sa Machine analytique. Ada, furieuse, lui envoie une lettre exprimant sa colère. Finalement, tous deux aplanissent leur différend ; la préface de Babbage est publiée séparément et anonymement.

En juillet 1843, Ada écrit à Babbage : «Je voudrais inclure dans une de mes notes quelque chose sur les nombres de Bernoulli, afin de montrer comment une fonction implicite peut être trouvée par la machine sans avoir été préalablement

résolue par l'esprit et les mains de l'homme. Communiquez-moi les données et les formules nécessaires.» Ada a étudié les nombres de Bernoulli avec De Moivre deux ans auparavant, mais elle a apparemment besoin de se rafraîchir la mémoire.

Cette lettre prouve que l'idée d'inclure un programme calculant les nombres de Bernoulli est d'Ada. D'autre part, Babbage a fourni les formules pour calculer les nombres de Bernoulli, ce qu'il confirmera 21 ans plus tard dans son autobiographie.

Qui d'Ada ou de Babbage a écrit le programme de calcul des nombres de Bernoulli ? Ada en est certainement capable, car elle connaît très bien le mécanisme de programmation ; elle a même amélioré des notations de pro-



grammation de Babbage! En outre, des lettres échangées entre Babbage et Ada à cette époque indiqueraient que les contributions de Babbage se sont limitées à la formule mathématique et qu'Ada elle-même écrit le programme.

Babbage a écrit plusieurs petits programmes pour la Machine analytique dans ses carnets en 1836 et 1837, mais aucun d'entre eux n'atteignait la complexité du programme de calcul des nombres de Bernoulli. La formation initiale d'Ada l'a familiarisée avec les propriétés des nombres. Il est possible qu'Ada ait compris qu'un programme sur les nombres de Bernoulli est un bon moyen de montrer certaines des caractéristiques essentielles de la Machine analytique, tel le branchement conditionnel. Comme Menabrea mentionne les nombres de Bernoulli, le programme d'Ada s'intègre parfaitement à la traduction.

En 1985, Dorothy Stein, de l'Université de Londres, publia une importante biographie d'Ada, où elle affirme qu'Ada était une mathématicienne incompétente, incapable d'écrire le programme des nombres de Bernoulli elle-même.

La conclusion de D. Stein est principalement fondée sur deux arguments. Premièrement, elle signale une erreur dans la traduction de Menabrea par Ada, où cette dernière traduit une coquille en français par une assertion mathématique impossible. L'article original de Menabrea contenait «le cos. de $n = \infty$ », alors qu'il fallait lire «le cas de $n = \infty$ ». Ada avait traduit littéralement «lorsque $\cos n = \infty$ », ce qui est mathématiquement impossible (un cosinus est compris entre -1 et 1).

Deuxièmement, D. Stein cite des lettres échangées entre Ada et ses précepteurs, qui montrent qu'Ada avait des difficultés avec les substitutions fonctionnelles (montrer une équation en substituant une fonction par son identité).

Ada avait effectivement mal traduit un passage de l'article de Menabrea, mais on ne peut de bonne foi l'attribuer à une incompétence en mathématiques. Ce n'était pas la seule erreur contenue dans son article : elle avait également apposé à la fin de sa dernière note ses initiales sous la forme A. A. L. au lieu de A. A. L. Ses 64 pages de traduction et d'annotations avait été revues par Babbage et par d'autres, à qui ces erreurs avaient également échappé.

L'accusation de mal comprendre la substitution fonctionnelle est plus

importante, car c'est un concept vital pour les programmeurs. À cette époque, l'algèbre était la discipline mathématique de pointe en Angleterre, et Ada prenait ses cours par correspondance. Sachant que ses professeurs l'aidaient gratuitement, Ada devait plutôt lui écrire pour des sujets qu'elle n'avait pas compris que pour des concepts déjà assimilés. Le niveau de compétence mathématique de ses dernières lettres montre que, malgré ses possibles difficultés avec les substitutions fonctionnelles avant la rédaction des notes, elle les avait certainement assimilés lors de leur écriture.

La santé d'Ada déclina après 1843, limitant sa pratique des mathématiques. Elle mourut le 27 novembre 1852, probablement d'un cancer de l'utérus. À sa demande, elle fut enterrée auprès de son père. Ses travaux restèrent relativement obscurs jusqu'en 1953, lorsque Bertram Bowden écrivit une histoire des calculateurs où il mentionna les travaux d'Ada et la qualifiait de «prophète».

De nombreux pionniers de l'informatique ont entendu parler des travaux de Babbage et des publications d'Ada, mais ils procédèrent généralement à leur propre percée conceptuelle. Howard Aiken, le professeur de l'Université Harvard qui conçut et construisit le *Mark II* en 1943, déclarait être un successeur direct de Babbage. Il ne connaissait cependant pas bien les travaux d'Ada et ne comprit pas l'importance du branchement conditionnel.

Marjorie Wilkes, qui construisit l'ordinateur EDSAC à Cambridge, en 1949, s'est ensuite passionné pour Babbage : «Si elle avait été mieux connues, en détail, à la fin des années 1930, ses œuvres auraient contribué au développement des ordinateurs.» Autrement dit, une meilleure connaissance de l'histoire des sciences aurait fait gagner du temps aux ingénieurs.

Eugene Eric KIM est éditeur technique de la revue *Dr. Dobbs's Journal*. Betty Alexander TOOLE, professeur d'informatique au Collège dominicain de San Rafael, a publié plusieurs lettres d'Ada.

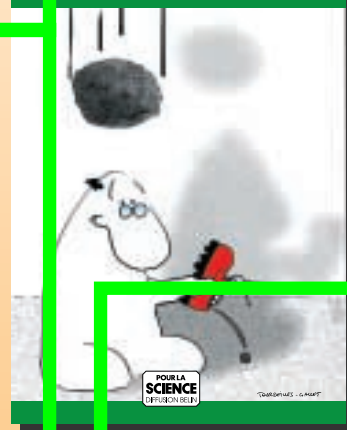
J.M. DUBBEY, *The Mathematical Work of Charles Babbage*, Cambridge University Press, 1978.

Anthony HYMAN, *Charles Babbage: Pioneer of the Computer*, Princeton University Press, 1982.

DES CAILLOUX DANS LES CHOSSES SÛRES

DIDIER NORDON

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 - 70 F
Code 1897

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 98

La chirurgie assistée par ordinateur

ERIC CRIMSON • RON KIKINIS • FERENC JOLESZ • PETER BLACK

Les chirurgiens utilisent la réalité virtuelle pour exciser des tumeurs avec une meilleure précision.

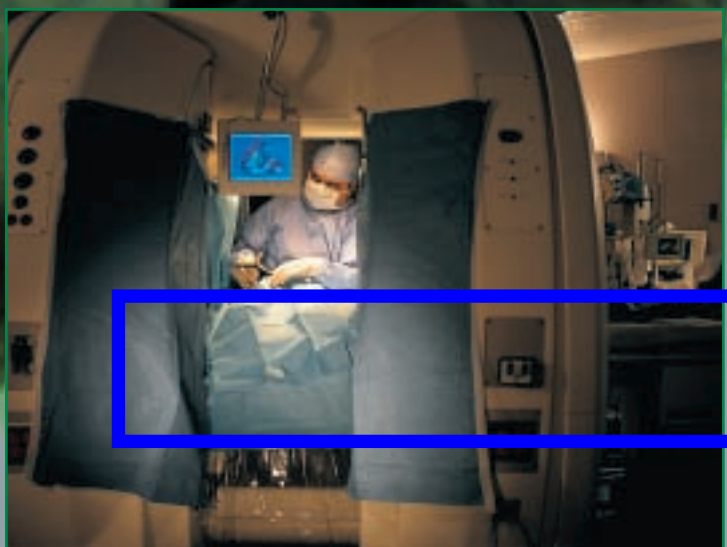
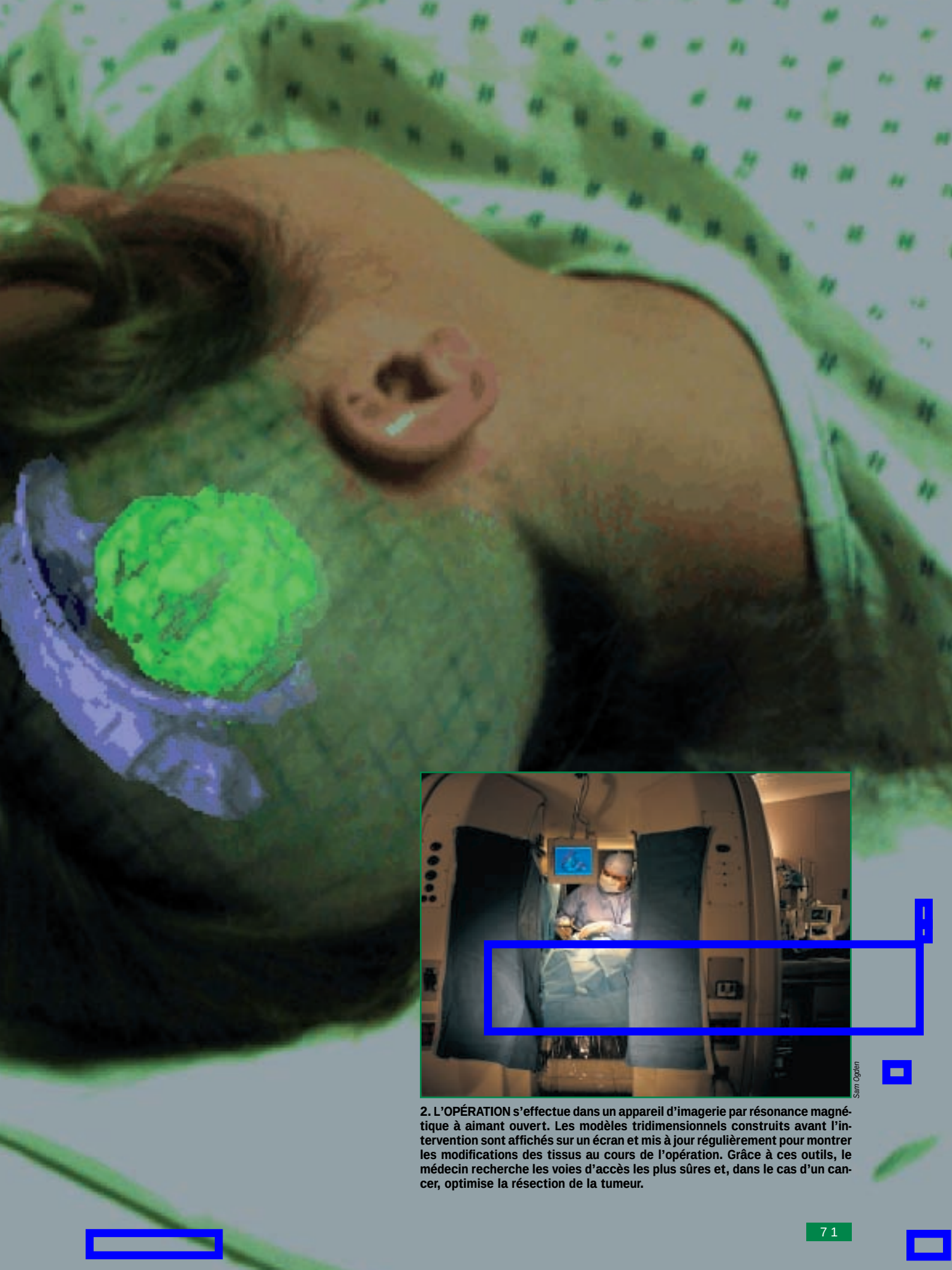
Dans un bloc opératoire, une jeune femme est endormie. Le chirurgien procédera bientôt à l'ablation d'une tumeur du cerveau responsable d'attaques cérébrales quasi quotidiennes. L'intervention est risquée : la tumeur comprime le cortex moteur, le tissu nerveux qui commande les mouvements volontaires. À l'œil nu, la tumeur et le cortex sain ont le même aspect, mais la tumeur se développera de nouveau si le chirurgien ne l'élimine pas complètement, et la jeune femme restera paralysée si une partie du cortex sain est prélevée.

L'intervention est cependant possible, car le neurochirurgien dispose d'un système de chirurgie assistée par ordinateur. Un écran d'ordinateur affiche un modèle géométrique en trois dimensions de la tête de la patiente construit à partir de clichés obtenus grâce à la technique non invasive d'imagerie par résonance magnétique.

À l'aide de la souris, il oriente l'image afin d'avoir la vue qu'il aura pendant l'intervention ; puis, toujours à l'écran, il enlève la peau, la couche grasse et l'os : le cerveau apparaît. La tumeur et d'autres éléments importants, tels que les vaisseaux sanguins et le cortex moteur, sont représentés en différentes couleurs. Observant que la tumeur touche à la fois le cortex moteur et les vaisseaux sanguins majeurs, le chirurgien établit un programme qui minimisera le risque d'hémorragie et de paralysie.

Il s'approche alors de la patiente, couchée sur la table d'un système d'imagerie par résonance magnétique spécialisé. Alors que les systèmes classiques sont composés d'un grand cylindre creux qui contient un aimant

1. UNE TUMEUR (en vert) dans le cerveau d'une femme est affichée grâce à des images enregistrées au cours de l'opération et traitées par un ordinateur équipé de programmes d'interprétation d'images.



Sam Ogden

2. L'OPÉRATION s'effectue dans un appareil d'imagerie par résonance magnétique à aimant ouvert. Les modèles tridimensionnels construits avant l'intervention sont affichés sur un écran et mis à jour régulièrement pour montrer les modifications des tissus au cours de l'opération. Grâce à ces outils, le médecin recherche les voies d'accès les plus sûres et, dans le cas d'un cancer, optimise la résection de la tumeur.

où le patient est allongé et inaccessible, ici le cylindre est un ensemble de deux anneaux (voir la figure 2) entre lesquels le chirurgien opère ; des clichés du cerveau de la patiente sont réalisés en cours d'opération.

Le chirurgien abaisse un écran qui affiche le modèle géométrique qu'il a visualisé auparavant, superposé à une image vidéo en direct de la patiente allongée sur la table. Comme si ses yeux étaient des rayons X, il localise les structures internes avant même de saisir le scalpel. Guide par l'image vidéo, il dessine sur le crâne de la patiente la position de la tumeur et d'autres structures importantes, puis esquisse la forme de la petite ouverture qu'il pratiquera dans la boîte crânienne pour accéder à la tumeur.

L'intervention commence alors. Au cours de l'opération, une sonde

stérile, insérée périodiquement dans l'incision, lui indique sur l'écran la position exacte et la trajectoire suivie. Il sait ainsi à quelle distance se trouve son scalpel du cortex moteur et des vaisseaux sanguins.

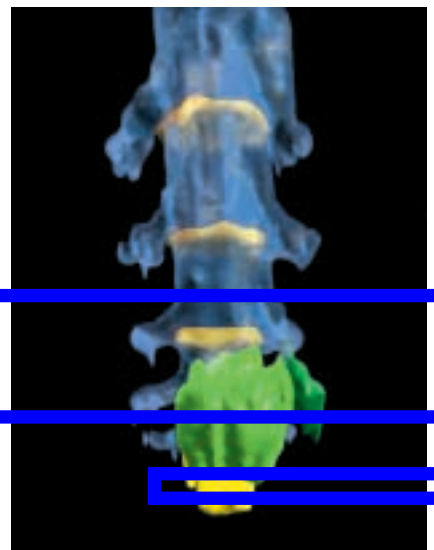
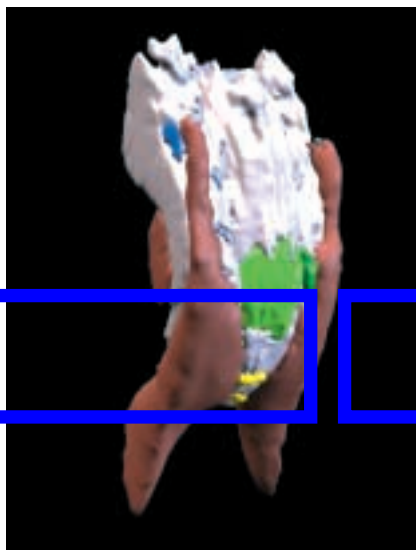
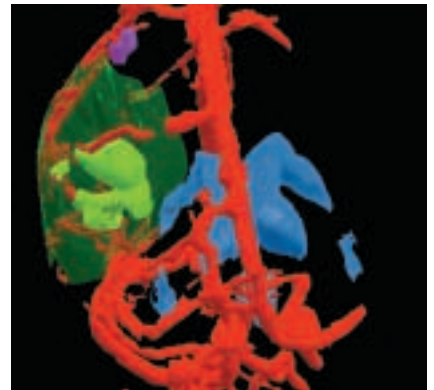
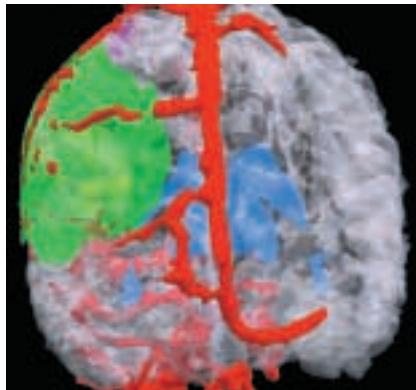
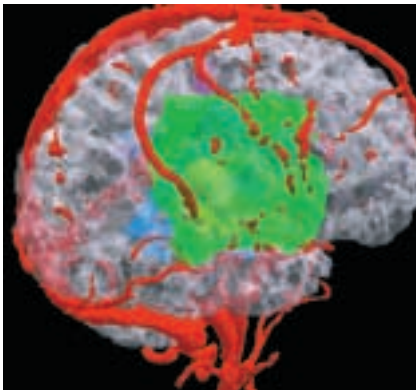
Périodiquement, il réactualise les images par résonance magnétique dans la région de la sonde. En quelques secondes, les images s'affichent et se superposent au modèle préopératoire. Il compare la position actuelle de la tumeur avec celle d'avant l'intervention, ainsi que d'autres éléments, tels des déplacements ou des déformations. En outre, les images l'aident à localiser les restes de la tumeur.

Grâce à ces informations, l'opération est une réussite. Quelques jours plus tard, la patiente quitte l'hôpital, convalescente, mais prête à commencer une nouvelle vie.

De réels progrès

Cette description s'applique à n'importe laquelle des opérations (environ 250 au cours des trois dernières années) qui ont été effectuées par notre équipe à Boston. Le système de guidage dans l'appareil d'imagerie par résonance magnétique à aimant ouvert est né d'une collaboration entre le Laboratoire d'intelligence artificielle de l'Institut de technologie du Massachusetts, l'Hôpital de Boston et la Société General Electric Corporation. D'autres appareils analogues sont utilisés en Europe.

La chirurgie vidéo-assistée renforce la vision du chirurgien, qui peut alors proposer des traitements plus efficaces. Elle facilite l'identification des contours d'une tumeur et de la voie d'accès la plus sûre et la moins traumatisante. Ainsi, le chirurgien peut retirer



3. LES RECONSTRUCTIONS D'UN CERVEAU (ci-dessus) et de la base d'une colonne vertébrale (ci-dessous) ont été «segmentées» : les structures identifiées apparaissent avec des couleurs différentes. On peut effectuer des rotations, ou encore atténuer ou supprimer certains éléments. Dans le cerveau, on voit les vaisseaux sanguins (en rouge),

les ventricules (en bleu), une tumeur (en vert) et un kyste dans la tumeur (en jaune). Les clichés de la colonne vertébrale montrent l'os (en blanc), les muscles (en rose), les espaces intervertébraux (en jaune), les méninges qui entourent la moelle épinière (en bleu clair), une tumeur (en vert clair) et des zones tumorales suspectées (en vert foncé).



totallement certaines tumeurs ou, en cas de cancers trop diffus ou trop invasifs, éliminer le plus grand nombre de tumeurs et améliorer ainsi la vie du patient. De plus, il raccourcit les protocoles opératoires, donc minimise l'anesthésie et la perte de sang. Des interventions qui auraient été trop risquées il y a quelques années, sont aujourd'hui possibles.

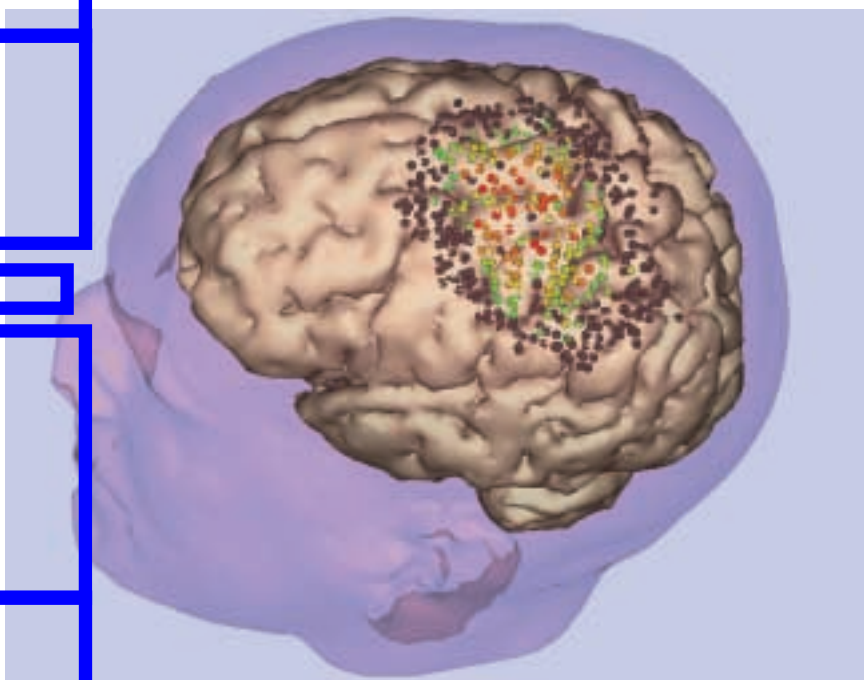
Visions l'envers du décor et découvrons les principales techniques utilisées. La première étape est la construction, non invasive, d'une représentation en trois dimensions de la surface et de l'anatomie interne de la partie du corps ou du volume à traiter.

La construction du modèle

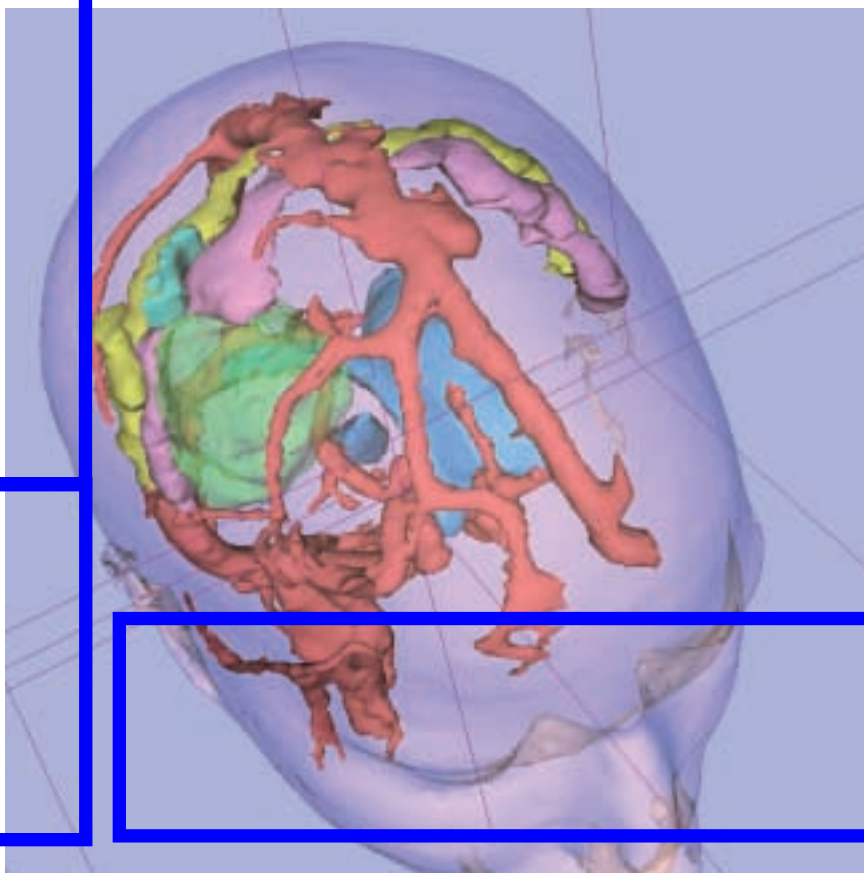
Quand on irradie le corps à l'aide de rayons X, ceux-ci sont différemment absorbés par les os et par les organes. Ainsi, certaines zones apparaissent plus foncées que d'autres sur la plaque radiographique. Cependant, l'image est plane : des structures tridimensionnelles, principalement les os, sont projetées en deux dimensions.

En revanche, le scanner et l'imagerie par résonance magnétique nucléaire fournissent une série de coupes virtuelles à des profondeurs déterminées (voir le bandeau en haut de l'article). Le médecin dispose de centaines de coupes minces, dont chacune peut être visualisée individuellement. Stockées dans la mémoire d'un ordinateur, elles se combinent en un modèle tridimensionnel où chaque point est défini par un numéro de ligne et un numéro de colonne sur une coupe et par le numéro de la coupe. L'imagerie par résonance magnétique distingue mieux les diverses structures anatomiques. Mesurant les réactions de l'organisme à des champs magnétiques, elle évite en outre l'exposition des patients à des rayonnements ionisants.

Dans le champ magnétique constant qui est appliqué par les deux anneaux, certains protons (chargés positivement, ces particules constituent, avec les neutrons, les noyaux des atomes) tournent sur eux-mêmes à la façon de topsies. Les impulsions d'un second champ magnétique dévient l'axe de rotation des protons, qui retrouve progressivement son orientation initiale, à la fin de l'impulsion : on mesure l'énergie libérée lors de ce retour afin de



Michael Leventon



Arya V. Davatzikos et Alexandra V. Chabrier, Brigham and Women's Hospital ; David Gering, MIT

4. La CARTOGRAPHIE FONCTIONNELLE révèle les zones corticales qui commandent des muscles spécifiques. On obtient ces images à l'aide d'un dispositif, qui envoie des impulsions électriques inoffensives en des points précis du cerveau, et d'électrodes réparties sur l'ensemble du corps, qui indiquent quels muscles sont activés. Dans le cerveau (en haut), les points indiquent les centres qui commandent des réactions fortes (en rouge), moyennes (en orange et en jaune), faibles (en vert) et nulles (en marron) des muscles de la main droite. On peut fusionner les cartes fonctionnelles avec des modèles structuraux. Dans le cerveau d'une personne atteinte d'un cancer (en bas), une partie du cortex moteur (en rose et en turquoise) a été déplacée par la tumeur (en vert).



connaître la densité de protons en rotation dans les tissus. Puis, comme les divers tissus contiennent des densités de protons différentes (selon qu'ils ont plus ou moins d'eau, par exemple), on distingue des zones sur les images. Plus un tissu émet d'énergie, plus il apparaît clair sur l'image qui est calculée par l'appareil.

Après la combinaison des coupes en deux dimensions – qui forme le modèle complet en trois dimensions –, on effectue une «segmentation», c'est-à-dire que chaque volume élémentaire du modèle est regroupé avec les éléments analogues de son voisinage. Les groupes ainsi constitués

sont les structures anatomiques : les tissus adipeux et osseux, les vaisseaux sanguins, la peau, les ventricules (cavité remplies de liquide), le liquide céphalo-rachidien, les matières grises et blanches... L'ordinateur caractérise automatiquement les éléments de volume en fonction de leur brillance : le crâne et les ventricules sont souvent des structures évidentes identifiées immédiatement.

Cependant, les frontières irrégulières sont ambiguës. Par exemple, l'ordinateur trouve parfois difficilement la limite entre la matière grise, dans le cortex cérébral, et la matière blanche, sous-jacente, ou entre une tumeur et le

tissu normal. Pour résoudre ce problème, plusieurs équipes ont inventé de nouveaux algorithmes d'interprétation des intensités ambiguës.

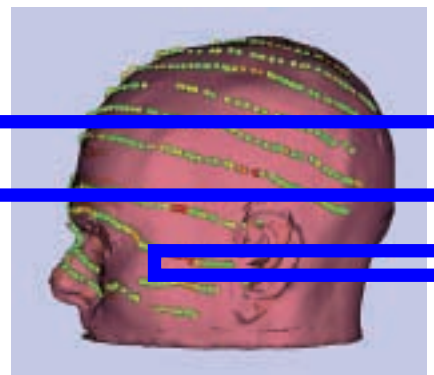
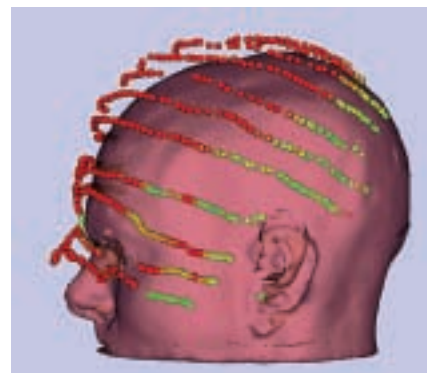
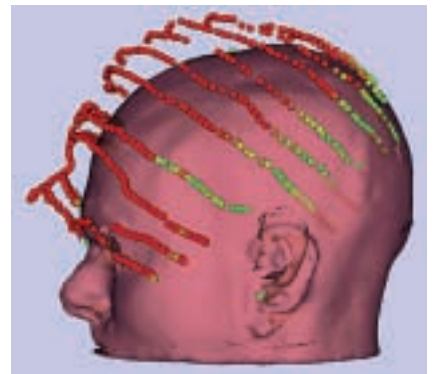
Tout d'abord, on sélectionne manuellement quelques éléments de volume qui appartiennent clairement à un tissu et l'on enregistre leurs intensités. Ainsi, chaque tissu est caractérisé par un intervalle de densités. L'ordinateur examine ensuite la brillance des autres éléments et les attribue aux tissus qui leur ressemblent le plus.

Un autre algorithme, créé par notre collègue William Wells, valide les attributions en corrigeant les variations des champs magnétiques émis



Michael Leventon

5. UN MASQUE DE LUMIÈRE LASER (*lignes rouges*) identifie les contours du visage d'une patiente allongée sur la table d'opération (*à gauche*). Un ordinateur effectue des rotations et des translations



du modèle (*à droite*) jusqu'à ce que les contours du visage virtuel et du masque laser soient parfaitement alignés : le modèle informatique correspond alors à l'image réelle du cerveau.

par l'aimant : la quantité d'énergie reçue varie d'une partie de la zone scannée à une autre, de sorte que certains éléments de volume apparaissent plus brillants ou plus sombres qu'ils ne devraient l'être, et ils conduisent à une mauvaise classification des tissus.

Le programme de W. Wells commence par engendrer une liste des intensités qui devraient être celles des divers tissus si l'impulsion magnétique était uniforme. Puis il compare l'intensité de chaque élément d'image à la liste et chaque fois que cela est possible, détermine son type cellulaire. Lorsque l'intensité est à l'extérieur d'un intervalle d'énergie, mais assez proche, le programme admet provisoirement que le type de tissu est celui de l'intervalle voisin. Il estime alors l'erreur de champ magnétique en calculant la différence entre les intensités réelles et les valeurs prédites, et il ajuste les intensités, recommence l'étape de classement des éléments de volume et effectue les corrections nécessaires. Il répète ces étapes jusqu'à obtenir une caractérisation de tous les éléments de volume.

Toutefois, les tissus sont indiscernables à partir de leur seule intensité de résonance magnétique. Par exemple, la matière blanche du cerveau et les muscles du cou, qui ont parfois une composition moléculaire similaire, correspondent à des intervalles de densités identiques. Un autre logiciel évite cette confusion : il utilise un atlas d'anatomie numérisé et prédit les positions générales de différentes structures. Si l'ordinateur trouve une zone qui est soit de la matière blanche, soit du muscle, dans une partie du corps qui ne contient pas de muscle, il conclut que le tissu est de la matière blanche. Enfin, le radiologue contrôle les segmentations sur un écran et valide la caractérisation définitive des tissus.

Des détails complémentaires

Lorsque chaque élément d'image est ainsi caractérisé par son type tissulaire, d'autres programmes délimitent les tissus par des couleurs différentes. Par exemple, nous représentons les vaisseaux sanguins en rouge, les ventricules en bleu et les tumeurs en vert.

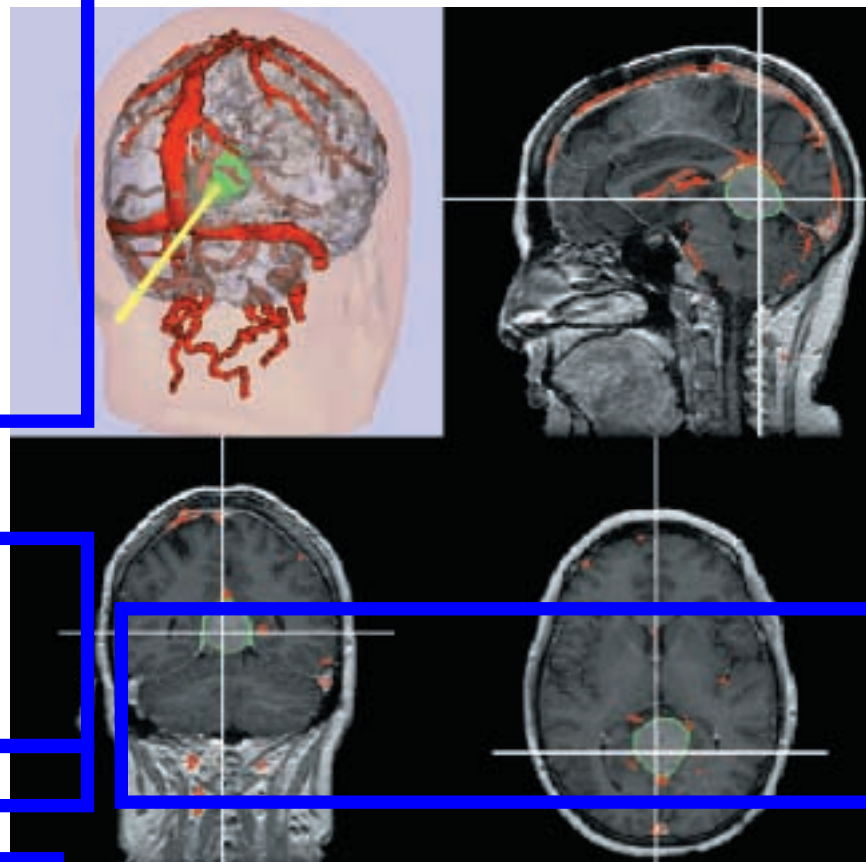
Toutefois, bien que très utile, la segmentation standard ne fournit pas

toutes les informations anatomiques et physiologiques indispensables. D'autres astuces algorithmiques sont nécessaires.

Par exemple, alors que l'imagerie par résonance magnétique classique ne le permet pas, comment délimiter avec netteté les vaisseaux sanguins ? L'équipe chirurgicale dresse une carte des vaisseaux sanguins, nommée angiogramme, en réglant le système d'imagerie pour qu'il détecte spécifiquement les liquides en mouvement (le sang). L'angiogramme ainsi obtenu est superposé aux premiers clichés d'imagerie par résonance magnétique en un modèle tridimensionnel que notre système d'enregistrement automatique optimise en cherchant la meilleure façon d'effectuer des translations et des rotations d'un ensemble de données par rapport à l'autre. Le programme exploite un concept mathématique nommé information mu-

tuelle, où des régions sont alignées en fonction de la quantité d'informations qu'elles contiennent. Par exemple, des zones qui présentent une grande diversité de textures sont superposées avec des régions également riches en informations, tandis que les zones d'intensité uniforme sont associées à d'autres régions pauvres en informations.

Des régions corticales essentielles, tel le cortex moteur, ne se distinguent pas de autres types de cortex : l'intensité des signaux et l'aspect sont identiques. Pour les différencier, deux méthodes non invasives existent. Lorsqu'un muscle fonctionne, le sang afflue dans la région du cortex qui commande ce muscle : l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle détecte ces variations et permet de cartographier le cortex. Par ailleurs, nous avons conçu, avec le service d'anesthésie de l'Hôpital Brigham et Women



UNE SONDE révèle la trajectoire et la position exactes du scalpel pendant l'opération. Cette sonde comporte une extrémité stérile que le chirurgien applique sur les tissus opérés ; la position de la sonde est identifiée par trois caméras fixes, qui détectent le faisceau infrarouge émis par la sonde. L'ordinateur affiche souvent le modèle tridimensionnel et des coupes transversales en deux dimensions du cerveau vu de côté, du dessus et de l'arrière. La pointe de flèche jaune sur le modèle en trois dimensions et les intersections des axes sur les autres images indiquent la pointe de la sonde. La tumeur est en vert, et les vaisseaux sanguins en rouge.

de Boston et avec le service de psychiatrie de l'École de médecine de Harvard, un stimulateur magnétique transcrânien. Cette stimulation non invasive est indolore et inoffensive. Elle s'effectue à l'aide d'une paire d'électro-aimants, qui induit des courants électriques dans des zones précises du cortex cérébral. Des capteurs électriques sur la peau du patient identifient les muscles concernés par la stimulation de points donnés du cortex (voir la figure 4); les informations obtenues peuvent être intégrées au modèle virtuel de la tête de notre patient.

La superposition du virtuel et du réel

Les modèles de visualisation des structures internes deviennent particulièrement utiles lorsqu'ils sont superposés aux structures du patient allongé sur la table d'opération. Ainsi, l'anatomie interne est directement montrée au chirurgien durant l'intervention, sans imposer à celui-ci de transformation mentale.

Classiquement, le marquage des images préopératoires directement sur le patient s'effectue avec un cadre stéréotaxique que l'on visse sur le crâne du patient. Durant les tests préopératoires et pendant l'intervention, il fournit les repères que le chirurgien utilise pour corrélérer les images préopératoires avec le cerveau lui-même pendant l'opération. Toutefois, malgré l'anesthésie locale, ce dispositif est douloureux pour le patient et encombrant pour le chirurgien.

En 1995, notre collègue Steven White a proposé d'utiliser la lumière laser afin de remplacer ces cadres. Le faisceau d'un laser, qui est une ligne mince, est d'abord déformé par une lentille de façon qu'un segment lumineux parvienne au cuir chevelu et au visage du patient, dont la tête est immobilisée durant l'enregistrement des images et l'intervention chirurgicale. Sur le crâne du patient, ce segment est déformé par les reliefs. Une caméra enregistre ces déformations, qui sont regroupées dans le modèle segmenté de la tête du patient. Le faisceau est ensuite déplacé vers le haut du visage par incréments prédéfinis, jusqu'à ce que la topologie de la surface de la tête du patient dans sa position exacte et fixe soit mémorisée.

Ensuite, un programme fait tourner le modèle de la tête afin de superposer exactement le masque laser au visage (voir la figure 5). Enfin, on calcule la position du chirurgien par rapport à celle du système laser et l'on oriente l'image selon son angle de vue. La tête virtuelle peut s'incruster dans les images vidéo du patient.

Pendant l'intervention

La localisation de la cible n'est qu'un début. L'objectif majeur de la chirurgie vidéo-assistée reste le contrôle de la position du scalpel à tout instant.

À cet égard, nous avons mis au point une sonde équipée de diodes électroluminescentes à infrarouge, dont la lumière émise est enregistrée par trois caméras fixes. Pour se repérer au cours de l'opération, le chirurgien touche le tissu qu'il veut couper avec l'extrémité stérile de la sonde. Grâce à des méthodes de triangulation, les ordinateurs reliés aux caméras calculent la position exacte de la sonde dans le corps et l'affichent sur le modèle anatomique. Notre ordinateur montre la position de la sonde en coupe transversale du dessus, de face et de côté (voir la figure 6).

A mesure que le chirurgien déplace et excise, le modèle initial devient très vite obsolète. L'appareil de résonance magnétique à aimant ouvert sera à mettre à jour les images : pendant l'intervention, qui se déroule à l'intérieur de l'aimant cylindrique, de nouvelles images sont enregistrées et réunies aux données antérieurement calculées. Ces mises à jour sont particulièrement importantes lorsque les structures sont molles et déformables.

Aujourd'hui, les nouvelles images produites sont uniquement en deux

dimensions et sont affichées soit à côté du modèle préopératoire, soit superposées à celui-ci, selon la préférence du chirurgien. Nous espérons obtenir des mises à jour directement en trois dimensions dans un an environ.

Les techniques que nous avons décrites, et d'autres encore, ne s'appliquent pas seulement en neurochirurgie : elles sont aussi utilisées pour certains opérations complexes des os, du nez, des reins, du foie, de la colonne vertébrale et d'autres tissus.

En radiothérapie anticancéreuse, des méthodes de construction de modèles et d'imagerie en temps réel facilitent l'irradiation sélective des tumeurs : on focalise mieux les rayons sur les tissus cancéreux, et l'on épargne les tissus environnants. L'efficacité de la radiothérapie et de la chimiothérapie est également évaluée par techniques d'imagerie qui mettent en évidence des caractéristiques telles que la taille et la localisation des tumeurs avant et après traitement.

Des diagnostics plus précoces seront possibles grâce à ces techniques. Notre équipe teste aujourd'hui des algorithmes de détection de tumeurs du sein à partir des représentations tridimensionnelles construites grâce à des clichés d'imagerie par résonance magnétique.

Toutes ces techniques doivent encore être perfectionnées. Les tissus très mous, par exemple, sont difficiles à analyser, parce qu'ils se déforment beaucoup lorsque le patient respire ou contracte certains muscles.

Pour mieux les décrire, on explore aujourd'hui des algorithmes de prédiction des déformations des tissus.

L'ordinateur devenu un précieux assistant du chirurgien, les interventions chirurgicales seront moins invasives, plus courtes et moins risquées.

Eric GRIMSON est professeur de génie médical à l'Institut de technologie du Massachusetts. Ben KIKINIS est directeur du Laboratoire d'explorations chirurgicales à l'Hôpital Brigham et Women de Boston. Ferenc JOLESZ est professeur de radiologie à l'École de médecine de Harvard. Peter BLACK est professeur de neurochirurgie à l'École de médecine de Harvard.

W.M. WELLS III, W.E.L. GRIMSON, R. KIKINIS et F.A. JOLESZ, *Adaptive Segmentation of MRI Data*, in *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 15, n° 4, pp. 426-441, août 1996.

P.M. BLACK et al., *Development and Implementation of Intraoperative Magnetic Resonance Imaging and Its Neurosurgical Applications*, in *Neurosurgery*, vol. 41, n° 4, pp. 831-842, octobre 1997.

Ferenc A. JOLESZ, *Image-Guided Procedures and the Operating Room of the Future*, in *Radiology*, vol. 204, n° 3, pp. 601-612, 1997.

La culture des îles Andaman

SITA VENKATESWAR

*Les îles Andaman, dans l'océan Indien, abritent encore des chasseurs-
cueilleurs traditionnels. Pour combien de temps ?*



Pendant des siècles, les habitants des îles Andaman ont fasciné et effrayé les voyageurs. Au XIII^e siècle, Marco Polo mentionne ces « indigènes à tête de chien ». Plus récemment, dans *Le signe des quatre*, Arthur Conan Doyle met en scène un bandit andaman qui tire des « fléchets empoisonnés » et dont la figure épouvantable « empêcherait de trouver le sommeil ».

Toute littérature mise à part, l'histoire et la culture des Andamans sont

mal connues, et elles risquent de le rester. Avant que des colons britanniques ne commencent à envahir les îles, au milieu du XIX^e siècle, environ 5 000 indigènes y vivaient, repartis en une douzaine de tribus de chasseurs-cueilleurs-pêcheurs semi-nomades. Aujourd'hui, il ne reste que quatre tribus : les Grand-Andamans, les Onges, les Jarawas et les Sentinelles, soit 450 à 500 personnes.

Quelques groupes ont réussi à maintenir leurs traditions : en particulier, les

Sentinelles (ainsi nommés parce qu'ils habitent l'île Sentinelle Nord) restent isolés et se montrent hostiles à l'égard des étrangers. La présence des colons, d'abord britanniques et aujourd'hui indiens, a toutefois exercé son influence : le temps est compté pour les cultures indigènes des Andamans.

D'où vient la population des îles Andaman ? Ils appartiennent au groupe des Négritos, autrefois répandus en Asie du Sud. Leur petite taille, leurs cheveux caractéristiques et leur peau

1. LA CULTURE DES GRAND-ANDAMANS, une des quatre tribus des îles Andaman, dans le golfe du Bengale, a presque disparu après un siècle et demi de colonisation. Vers 1890, le groupe subissait déjà l'influence de l'occupation britannique (à gauche) : malgré les peintures corporelles traditionnelles, les indigènes fumaient

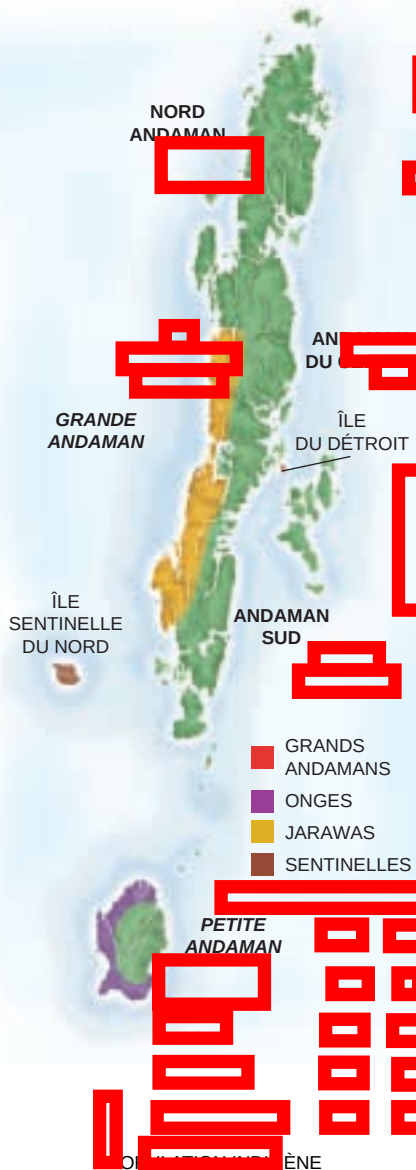
des pipes britanniques. Ils avaient aussi découvert des maladies, telles la syphilis et la rougeole. Aujourd'hui il ne reste qu'une quarantaine de Grand-Andamans. Une vieille femme (à droite) termine une soirée de pêche tandis que deux jeunes garçons viennent la rejoindre sur la plage.



Les îles Andaman



Photo: Y. K. S. / Musée de l'Homme



	1901	1951	1998
GRANDS ANDAMANS	625	23	39
ONGES	672*	150*	100*
JARAWAS	468*	50*	250*
SENTINELLES	117*	50*	100*

*ESTIMATIONS

2. LA POPULATION ACTUELLE des îles Andaman est constituée de quatre tribus : les Grand-Andamans, les Jarawas, les Onges et les Sentinelles. Les Grand-Andamans (à gauche) ont un héritage à la fois andamanais, malais et karen (une minorité du Myanmar, jadis la Birmanie). Cette tribu, qui occupait autrefois les îles Andaman du Nord, du Centre et du Sud, a été déplacée

très sombre les distinguent de la population indienne continentale et de la population des îles Nicobar, voisines des îles Andaman. Sont-ils apparentés à un autre groupe Négrito, les Semang de l'Asie du Sud-Est ?

Une récente étude génétique indique qu'ils descendraient directement des premiers hommes modernes qui ont émigré hors d'Afrique il y a environ un million d'années et qui seraient arrivés sur ces îles il y a 35 000 ou 40 000 ans, soit à partir de Sumatra en passant par les îles Nicobar, soit à partir des côtes de la Malaisie et du Myanmar (l'ex-Birmanie). À cette époque, le niveau de la mer était beaucoup plus bas, et l'archipel était accessible facilement en pirogue, voire à pied. Toutefois, les fouilles archéologiques les plus récentes n'ont trouvé d'occupation continue que depuis 2 200 ans.

Chasse, pêche et traditions

Il a été révisé à plusieurs reprises dans les îles Andaman, surtout parmi la tribu Onge, une centaine de personnes qui vivent aujourd'hui sur la Petite Andaman, dans deux campements permanents : Dugong Creek, au Nord, et South Bay, à l'extrémité Sud de l'île. Le reste de l'île est habité par des immigrants indiens, d'origine ethnique différente.

De nombreux entretiens avec une trentaine d'hommes, de femmes et

d'enfants m'ont révélé différents aspects de la vie dans la forêt et des traditions de cette tribu. J'ai d'abord appris que les Andamans, souvent décrits comme cannibales, semblent ne jamais l'avoir été. Des observateurs ont vraisemblablement pensé, en les voyant découper les cadavres de leurs ennemis et en jeter les morceaux au feu, qu'ils préparaient un festin. Ils ne mangeaient toutefois jamais les corps : ils souhaitaient seulement éloigner les mauvais esprits. En revanche, les corps des membres de la famille étaient enterrés sous la hutte comme pour que leurs esprits restent proches des vivants.

J'ai regroupé les différents témoignages que j'ai recueillis, dont voici quelques extraits. « Pendant la saison sèche, les ancêtres ou d'autres Onges récoltaient les fruits du jacquier et les stockaient. Ils remplissaient de grands paniers et recouvraient les fruits de feuilles sèches et les cachaient dans la forêt. De la sorte, ils avaient de la nourriture même quand il pleuvait beaucoup. Ils chassaient aussi et ramenaient du porc ; ils mangeaient les fruits du jacquier à la fin des repas. Il n'y avait pas de thé à l'eau chaude, mais que de l'eau. Ils stockaient beaucoup de bois sec, car on trouve difficilement du bois lors de la saison humide. Tout l'approvisionnement et le stockage du bois sont effectués durant la saison sèche. Ils construisent une grande hutte



Arrière de ceinture par Laurie Grace, d'après The Jarawa, par Joyanta Sarkar

par le gouvernement indien sur la minuscule île du Détroit. Les Jarawas (au milieu) sont restés beaucoup plus isolés, ne s'aventurant que rarement hors des forêts denses des îles Andaman du Sud et du Centre. Les Onges (à droite), qui continuent à se peindre le visage

et le corps avec de l'argile blanche, habitent aujourd'hui des territoires côtiers de la Petite Andaman. On ne voit que très rarement les membres de la tribu des Sentinelles, qui défendent vigoureusement leur île Sentinelle Nord contre les intrusions.

commune avant que la pluie n'arrive, afin d'être confortablement installés pendant la pluie.»

«Jadis, il n'y avait pas de travail salarié : nous avions tout notre temps pour construire nos maisons, attraper des porcs, les manger quand ils étaient gras. Les anciens n'avaient aucun ustensile, ils fabriquaient des pots en argile pour cuisiner le porc. Ensuite, au début de la mousson du Sud-Est, les sangliers maigrissent et ils ont moins de goût. Dans les criques de la forêt, il y a beaucoup de poissons ; nous pêchions des poissons et des crevettes.»

«Il n'y avait pas de fer ; nous utilisions le bois de l'aréquier... mais la mer nous apportait du fer, en l'échouant sur les plages. Et on utilisait la résine de la forêt pour aiguïser le métal. Autrement, nous utilisions le bois de la forêt. Nous avons fabriqué une pirogue en creusant un bois différent, mais elle a coulé quand elle a été mise à l'eau ; nous avons alors su que ce bois n'était pas bon. Nous avons essayé un autre bois, nous l'avons mis à l'eau et nous avons vu qu'il flottait. C'est celui-là que nous avons utilisé par la suite. C'est comme ça que nous avons appris les choses.»

«Aux temps anciens, il n'y avait pas de corde en nylon, la fibre utilisée aujourd'hui pour tuer les tortues. Nous allions dans l'eau pour encercler la tortue. Nous utilisions une essence de la

forêt ; nous fabriquions des torches avec des feuilles de jonc séchées, et nous l'allumions avec cette essence. À la torche, nous encerclions la tortue. Nous étions beaucoup d'Onges alors, et voilà comment nous cernions la tortue. Nous ne harponnions pas la tortue, nous n'utilisions des flèches que pour chasser le sanglier.»

«C'est aussi comme cela que nous attrapions le dugong (un mammifère marin proche du lamantin). Nous attendions la marée basse et ensuite nous allions chasser la tortue et le dugong la nuit. Pas à marée haute, car nous nous serions noyés. Ensuite, quand c'était fait, nous retournions dans la forêt, nous récoltions plus d'essence de bois, et nous l'allumions pour pister le sanglier.»

«Nous les Onges, étions nombreux alors. Nous n'avions pas peur de *Tommany* (l'esprit de la nuit), et nous allions en forêt la nuit. Nous n'avions pas peur alors. À cette époque, il y avait des Onges partout, beaucoup de familles partout. Nous étions nombreux. Les sangliers dormaient la nuit, et c'est à ce moment que nous les chassions. C'était facile. Nous revenions pendant la journée, et nous cherchions le sanglier que nous avions chassé la nuit d'avant. Nous le ramenions avec nous, nous le fumions et nous le cuisinions. C'est comme cela que nous vivions. Nous n'avions pas de vêtements, mais seulement des pagens de

la forêt. Les filles les faisaient avec des feuilles de joncs. Voilà quelques-unes des choses que nous faisons.»

Le rôle des esprits

Les enfants que j'ai consignés m'ont appris la vie matérielle et spirituelle des Onges. Ils considèrent qu'ils partagent leur univers avec des esprits, les *tomya*, qui se manifestent en faisant souffler les vents correspondant aux différentes saisons. À l'arrivée de la saison chaude et sèche (généralement en mars et en avril), les familles Onges quittaient la côte, où elles avaient chassé la tortue, pour l'intérieur de la forêt, afin de recueillir du miel. Ce déménagement marquait le début de la saison sèche, pendant laquelle les esprits quittaient l'île. Les familles d'un clan se rassemblaient dans la grande hutte commune, où les ossements des ancêtres étaient enterrés.

L'arrivée de l'esprit *Dare* dans la forêt, coïncidant la mousson du Sud-Ouest (généralement en juin), marquait la fin de la saison sèche, et le moment de quitter l'intérieur de la forêt pour des abris près des criques et des mangroves. Là, les Onges trouvaient des crabes, des poissons et les fruits du palétuvier. Lorsque l'esprit *Dare* était parti, en septembre, ils retournaient en forêt et chassaient le sanglier jusqu'à l'arrivée de l'esprit *Kwalokange*, avec la mousson du Sud-Est, en octobre. Ils

retournaient alors sur la côte et chassaient le dugong. Ils pensaient que l'esprit *Kwalokange* dévorait les sangliers restants, n'en laissant que quelques-uns pour l'esprit suivant, *Mekange*, associé au vent du Nord-Est. La présence

de *Mekange*, de novembre à février, indiquait aux Onges qu'ils devaient reprendre la chasse à la tortue.

Les Onges vivent aussi avec les esprits de leurs ancêtres, les *Onkoboykwo*, qui jouent un rôle actif dans leur vie. Ces

esprits, qui n'ont pas de dents, ne peuvent pas mâcher les aliments et pénètrent dans ces derniers pour satisfaire leur faim. Lorsqu'une femme mange un aliment contenant un esprit, elle conçoit un enfant, incarnation de l'esprit. Après leur mort, les Onges sont de nouveau transformés en *Onkoboykwo*. La nourriture fonde aussi des relations sociales : des liens importants sont noués entre un enfant et toutes les femmes qui l'ont allaité, de même qu'entre un enfant et l'homme ou la femme qui a procuré la nourriture qui a reconstruit sa mère.

Ces coutumes et ces croyances traditionnelles des Onges étaient en grande partie communes aux diverses tribus des îles Andaman. Elles disparurent progressivement avec la colonisation britannique, au milieu du XIX^e siècle.

Une longue exploitation

Avant l'arrivée des Britanniques, les habitants des îles Andaman n'étaient pas complètement isolés : ils constituaient une source d'esclaves pour les réseaux commerciaux du Sud et du Sud-Est asiatiques. Beaucoup de ces esclaves arrivaient chez le rajah de Kedah, qui en envoyait ensuite au roi du Siam, en tribut. Des esclaves Andamans seraient même arrivés jusqu'à la cour de France. En outre, habitant des îles, les Andamans ont toujours intégré dans leur culture des objets variés, échoués ou amenés par les visiteurs.

En 1858, le gouvernement britannique établit une colonie pénitentiaire permanente sur les îles. À cette époque, les indigènes occupaient la quasi-totalité des 20 îles de l'archipel. Ils furent chassés de leurs territoires sur les îles Andaman du Nord, du Centre et du Sud, et leur résistance fut souvent violemment réprimée. Des maladies les décimèrent. En 1901, quand les Britanniques entreprirent le recensement du subcontinent indien, ils comptèrent 625 Grand Andamans et estimèrent les populations des trois autres tribus à 672 pour les Onges, 468 pour les Jarawas et 117 pour les Sentinelles.

Après une brève occupation japonaise pendant la Seconde Guerre mondiale, les îles Andaman passèrent sous le contrôle de l'Inde en 1947. Rien ne changea pour les autochtones : le gouvernement indien, comme son prédécesseur, tenta d'assumer ce « fardeau de l'homme blanc » qu'est l'assistance aux populations indigènes. Les maladies continuèrent de réduire la population.



Sita Venkateswar

3. DES JARAWAS courent à la rencontre du bateau du gouvernement, qui leur distribue des noix de coco, des bananes, des morceaux de fer et des vêtements rouges (au XIX^e siècle, des anthropologues ont offert des vêtements rouges aux Jarawas, et la tradition s'en est perpétuée).



Photographies de Madhusree Mukerjee

4. DES COUTUMES ANCESTRALES persistent dans certains groupes Andamans, tandis que d'autres ont rejoint le monde moderne. Ainsi, une femme Onge prépare le riz, fourni par le gouvernement indien, pour le déjeuner de sa famille, dans une habitation traditionnelle, à South Bay, sur la Petite Andaman. Sur la petite île du Détroit, trois jeunes Grand-Andamans regardent un match de cricket à la télévision, dans la salle de classe (cartouche).

En 1951, quand l'Inde indépendante fit son premier recensement, le nombre des Grand-Andamans était tombé à 23. Les Onges n'étaient plus que 150, les Jarawas 50 et les Sentinelles 50.

Aujourd'hui, parmi la quarantaine de personnes qui descendent des Grand-Andamans, beaucoup ont aussi un proche ancêtre indien. Il ne reste plus que 100 Onges, 250 Jarawas et 100 Sentinelles. Les Grand-Andamans sont ceux qui ont le plus souffert, et le plus longuement, de la colonisation ; ils ont été, en quelque sorte en compensation, relogés sur la petite île du Déroit.

Les Grand-Andamans et les Onges sont aujourd'hui sédentaires. Ils ne vivent plus du produit de leur chasse ni de leur pêche, mais consomment des rations fournies par le gouvernement indien. Les Jarawas et les Sentinelles ont mieux résisté. Les Jarawas, qui vivent dans les forêts denses, n'ont que de rares contacts avec les étrangers, seulement quand ils se tolèrent et selon les modalités qu'ils définissent. Les Sentinelles voient rarement des étrangers.

Ces deux tribus, particulièrement les Sentinelles, défendent leurs territoires avec des arcs et des flèches, aujourd'hui renforcées avec des pointes en fer. L'administration indienne a récemment déclaré qu'elle souhaitait que les Jarawas deviennent des «citoyens à part entière», et elle tente de les amener à des relations plus pacifiques en leur promettant des noix de coco, des bananes, du riz, des vêtements et des morceaux de fer.

Les Jarawas sont menacés par l'empiètement croissant des étrangers sur leur territoire de chasse et de pêche. Ils prennent des risques de plus en plus grands pour obtenir du métal pour les pointes de leurs flèches, en organisant des raids dans des chantiers de construction de routes, des campements forestiers et des fermes. Le nombre et l'importance des «incidents jarawas» (qui ne sont rapportés par les médias que lorsqu'il y a des morts indiens) semblent indiquer que les pionniers, les exploitants illégaux et la police locale sont en guerre contre les Jarawas.

Les Sentinelles sont mieux protégées, car ils occupent une petite île isolée, dont l'accès reste difficile. Ils refusent tout contact avec le monde extérieur, et ils ont repoussé toute tentative d'atteindre leur île jusqu'en 1991, quand ils ont accepté quelques noix de coco offertes par une équipe d'anthropologues et d'administrateurs indiens. Il n'y a pas



5. L'HABITAT ONGE TRADITIONNEL (ci-dessus), à Dugong Creek, sur la Petite Andaman, reste préféré des habitants aux maisons en bois que le gouvernement leur a construites. En revanche les Grand-Andamans vivent dans de telles maisons (à droite).



Photographie de Madhusree Mukerjee

eu d'autre contact depuis. D'après le peu qui a été observé, leur mode de vie et leur culture matérielle ressemblent à ceux des autres groupes Andamans.

L'assimilation des indigènes par la société indienne a d'abord bénéficié aux colons. Quand les Britanniques étendaient leurs colonies sur les îles Andaman du Nord, du Centre et du Sud, et qu'ils projetaient d'exploiter à des fins commerciales les terres occupées par les Grand-Andamans, ils encourageaient le déplacement des indigènes dans des réserves. Après l'indépendance de l'Inde, les forêts de la Petite Andaman, où vivent les Onges, sont devenues des terrains de développement économique. Malheureusement, cette politique a toujours conduit à la réduction du territoire des tribus et à la destruction progressive de leur mode de vie. À terme, ces populations rejoignent les rangs des minorités marginalisées de la société indienne continentale.

Depuis quelques années, on emploie le terme d'«ethnocide» à propos de telles situations : les populations elles-mêmes ne sont pas éliminées, mais elles sont parquées dans des enclaves où elles deviennent dépendantes de

la majorité dominante qui leur a pris leur terre. La population dominante tente d'améliorer les conditions de vie des «primatifs» en détruisant tous les éléments de leur mode de vie «arriéré», et élimine ainsi leur culture.

Cette attitude, qui se prétend humanitaire, suppose aussi que le mode de vie des indigènes est inférieur et doit faire place à un autre, meilleur. Elle presume que les indigènes sont incapables d'envisager ou de planifier eux-mêmes leur propre avenir.

Selon David Maybury-Lewis, de l'Association *Survie des cultures* : «La terre, et la lutte pour la conserver, est au cœur du problème de la survie des cultures, car la garantie d'un territoire est ce dont les peuples tribaux ont le plus besoin.» Toutefois, les revendications territoriales des indigènes défient les autorités en place, de sorte qu'il n'est pas surprenant que si peu d'entre elles soient satisfaites. Tout débat international sur les droits de l'homme devrait prendre en compte ces revendications et proposer des solutions à ces conflits. Les habitants des îles Andaman ont le droit de décider eux-mêmes de leur avenir. Auront-ils le temps de le faire?

Sita VENKATESWAR est maître de conférences en anthropologie sociale à l'Université Massey, en Nouvelle-Zélande.

Ed R. RADCLIFFE-BROWN, *The Andaman Islanders*, Cambridge University Press, 1922, réédition 1970.

Lidio CIPRIANI, *The Andaman Islanders*, Frederic A. Praeger, 1966.

Vishvajit PANDYA, *Above the Forest* : A

Study of Andamanese Ethnology, Cosmology, and the Power of Ritual, Oxford University Press, New York et Delhi, 1993.

Sita VENKATESWAR, *Policing Power, Governing Gender and Reimagining Resistance : A Perspective on the Contemporary Situation of the Andaman Islanders*, PhD. dissertation, Department of Anthropology, Rutgers University, 1997.

Les oscillations de Bloch

MAXIME DUBAN • CHRISTOPHE SALOMON

Dans un champ électrique uniforme, les électrons d'un cristal ont un mouvement oscillant. Cet effet, prédit théoriquement dans les années 1920, n'a été détecté que récemment. On l'a observé pour des atomes ultrafroids piégés par de la lumière.

La description des circuits électriques est un pont aux ânes de la physique : dès le lycée, on apprend la loi d'Ohm, qui décrit le passage d'un courant dans un matériau conducteur, tel un fil de cuivre. Cette loi stipule que quand on applique au matériau une différence de potentiel électrique U , l'intensité I du courant est reliée à U par la relation de proportionnalité $U = RI$, où R est la résistance électrique.

Pourquoi cette relation ? Les physiciens du XIX^e siècle ont supposé que, sous l'action de la différence de potentiel constante, les électrons se déplaçaient en bloc, tous dans le même sens, engendrant un courant constant. Toutefois les pères de la mécanique quantique, au début du XX^e siècle, ont montré que les électrons ne sont pas de simples petites billes ; dans certaines circonstances, ils présentent des propriétés analogues à celles des vagues à la surface de l'eau. Une équation fondamentale de la mécanique quantique, l'équation de Schrödinger, décrit leur comportement : selon les circonstances, les électrons se comportent comme une bille ou comme une onde.

Le problème particulier des électrons circulant dans un matériau conducteur a été abordé théoriquement dès les premières heures de la mécanique quantique : en 1929, le physicien suisse Félix Bloch (1905-1983) a utilisé la toute nouvelle mécanique pour l'appliquer d'abord aux électrons d'un matériau cristallin. Dans ces systèmes, les électrons sont soumis aux forces électriques

exercées par les ions positifs et négatifs du cristal. Ces ions sont régulièrement ordonnés dans les trois directions de l'espace : de ce fait, le champ électrique ou baignant les électrons est périodique, c'est-à-dire invariant par translation (il se répète identique à lui-même quand on le décale d'une période de la structure cristalline).

Bloch calcula que, en raison de cette symétrie du réseau, chaque électron dans le cristal se comporte comme une onde

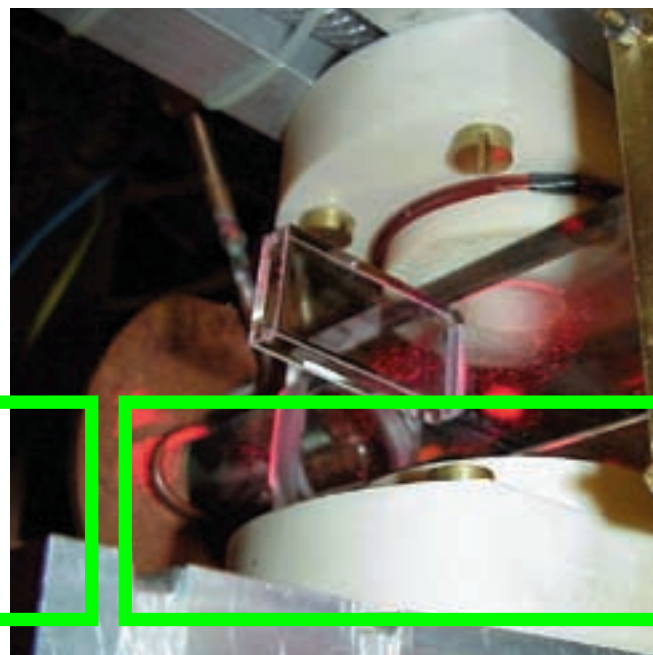
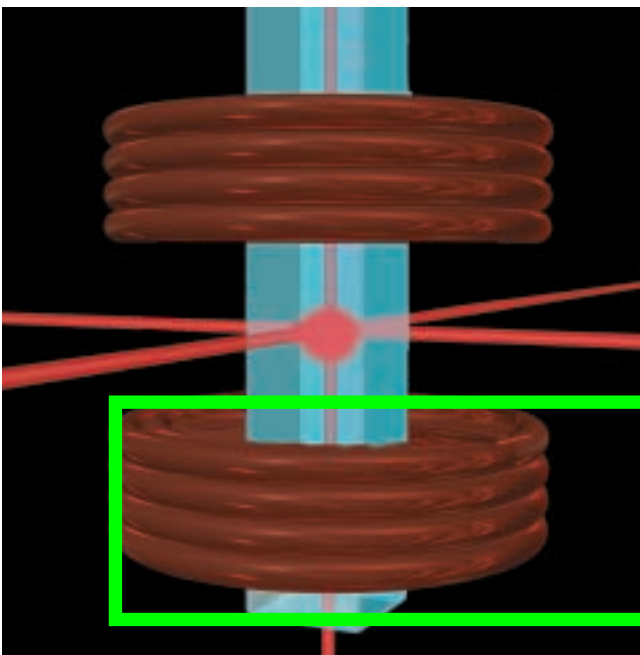
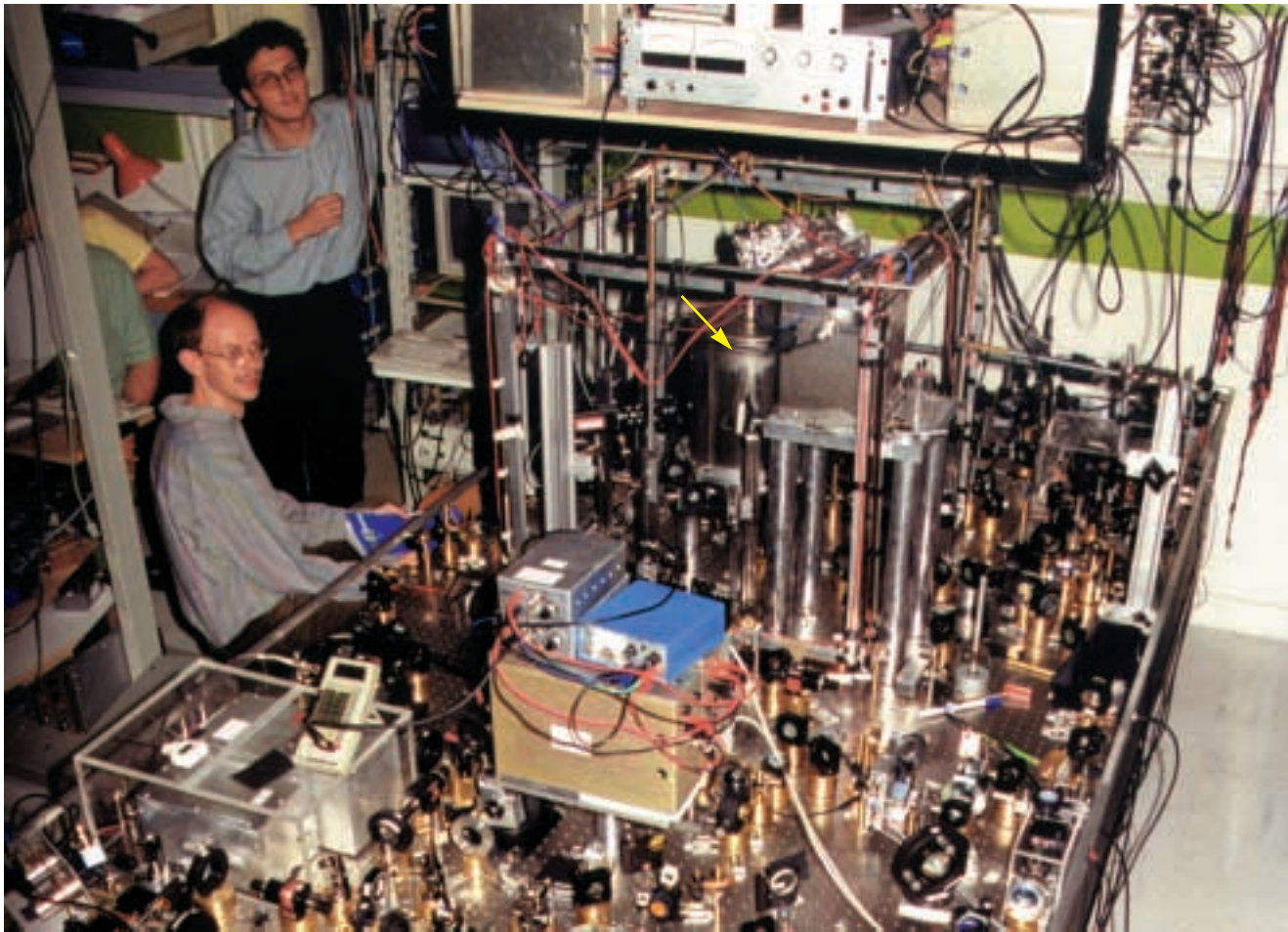


F. FELIX BLOCH (1905-1983) fut un pionnier de la résonance magnétique nucléaire. Il reçut le prix Nobel de physique en 1952, pour cette découverte, mais il avait bien d'autres titres à cette récompense : il avait étudié la propagation des électrons dans les solides cristallins, il avait identifié ce que l'on nomme aujourd'hui les parois de Bloch entre domaines magnétiques, dans les cristaux, et il avait mesuré le moment magnétique de l'électron. Bloch est le père de la physique du solide.

plane modulée par une fonction ayant la périodicité du cristal : au lieu d'être attaché à un ion particulier, chaque électron est délocalisé sur tout le réseau, avec une probabilité de présence augmentée entre les atomes. Ce résultat constitue la base de la théorie quantique du solide, qui décrit si bien les comportements de matériaux divers, tels les métaux, les isolants ou les semi-conducteurs.

Bloch avait également prévu un résultat surprenant : tant que les différences de potentiel appliquées restent faibles, les électrons oscillent ! En 1934, le physicien anglais Clarence Zener (1905-1993) poursuivit l'œuvre de Bloch en considérant des différences de potentiel supérieures, parce qu'il s'intéressait au problème pratique du « claquage des matériaux diélectriques » : il chercha la différence de potentiel maximale que l'on peut appliquer aux bornes d'un matériau isolant avant qu'il ne claque, c'est-à-dire qu'il ne devienne brusquement conducteur (dans l'air, quand on applique une différence de potentiel croissante entre deux électrodes, vient un moment où, l'air devenant conducteur, une étincelle apparaît : c'est le claquage). Zener analysa le comportement des électrons dans un cristal en présence d'un champ électrique constant. Il confirma que, dans un cristal parfait soumis à une différence de potentiel, les électrons oscillent, et il calcula les conditions du claquage.

L'oscillation des électrons est un effet d'origine quantique, bien différent de ce que décrivent les manuels élémentaires de physique : au lieu



G. Feynman, F. Schreck, M.-O. Mewes et C. Salomon

2. LES OSCILLATIONS DE BLOCH pour des atomes ultrafroids ont été observées dans ce dispositif expérimental, à l'Ecole normale supérieure de Paris. L'expérience s'effectue à l'intérieur du cylindre vertical, au centre du châssis (flèche). Dans le cylindre se croisent six faisceaux laser ayant tous la même longueur d'onde, au centre d'une cellule en verre qui contient des atomes de césium (en bas à gauche). Les faisceaux lasers capturent les atomes, les refroidissent et les confinent au point où le champ magnétique est nul, au centre des faisceaux. C'est l'échantillon dont on étudie les

oscillations de Bloch. La figure en bas à droite montre la lumière de fluorescence rouge émise par un nuage d'atomes de lithium piégés : la boule rouge, au centre, a un diamètre de cinq millimètres ; elle est composée de dix milliards d'atomes à une température de un millikelvin (un millième de degré au-dessus de la température du zéro absolu, lui-même à $-273,15$ degrés Celsius). On distingue, en blanc, les deux supports de bobines (les bobines sont à l'intérieur) qui produisent le champ magnétique utilisé pour le confinement des atomes.

d'induire un courant constant, une différence de potentiel, pourtant continue, engendre un courant alternatif ! Cette prévision étonnante n'a été expérimentalement testée que récemment, quand on a étudié le mouvement des électrons dans des matériaux semi-conducteurs nommés super-réseaux, où le mouvement d'atomes piégés par de la lumière.

Des ondes dans un cristal

Pour comprendre la nature de ce comportement surprenant, nommé aujourd'hui ondes de Bloch, conservons l'idée que le matériau est périodique. Cette propriété joue un rôle crucial lors de l'interaction du réseau cristallin avec l'onde. L'analogie d'une vague qui arrive sur une digue percée de trous

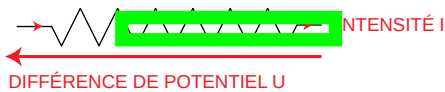
à intervalles périodiques aide à comprendre le phénomène. Les ouvertures dans la digue sont des sources d'ondes qui interfèrent, de sorte que, pour certaines directions seulement, derrière la digue, les contributions de toutes les vagues sont en phase et s'ajoutent.

En cristallographie, on utilise cet effet de « diffraction de Bragg » pour étudier la structure des matériaux : les ondes utilisées sont alors souvent des rayons X (voir la figure 5). Dans le cas de la conduction électrique dans un cristal, les ondes ne sont pas électromagnétiques, ce sont des ondes de matière. Comme pour les vagues ou pour la lumière, ces ondes sont diffractées par le réseau ionique pour des vitesses et des directions particulières.

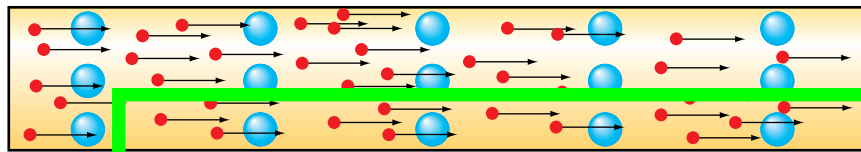
Plus précisément, imaginons un électron délocalisé sur tout le cristal et accéléré par une force électrique qE , où q est la charge de l'électron et E l'intensité du champ électrique (dans toute la suite de l'article, on se limitera à un mouvement à une seule dimension ; d'ailleurs, ce sont des oscillations de Bloch à une dimension que nous avons détectées). Initialement immobile, l'électron est mis en mouvement dans le sens opposé à celui du champ électrique (parce que sa charge électrique est négative). Sa vitesse augmente, de sorte que sa longueur d'onde diminue (le physicien français Louis de Broglie a montré qu'à un électron est associée une onde dont la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la vitesse). Vient alors un stade où l'onde électronique est diffractée par le réseau cristallin : ses interférences constructives engendrent sa réflexion. La force électrique continue d'agir sur les électrons, mais elle est alors opposée au mouvement : elle ralentit donc les électrons, les immobilise, puis les accélère dans la direction opposée, et ainsi de suite (voir la figure 7). Ce mouvement se répète périodiquement, et la période de cette oscillation est égale à h/Ed , où h est la constante de Planck, F la force appliquée et d le pas du réseau périodique (ici, la force F est la force électrique qE).

Si notre perception de la conductivité électrique reste dominée par la loi d'Ohm, c'est que ce mouvement oscillant ne se manifeste pas dans un cristal usuel, la dynamique des électrons n'est pas seulement gouvernée par la diffraction par le réseau cristallin, mais aussi par des diffusions sur des impuretés ou sur des défauts du cristal. Ceux-ci sont si nombreux que

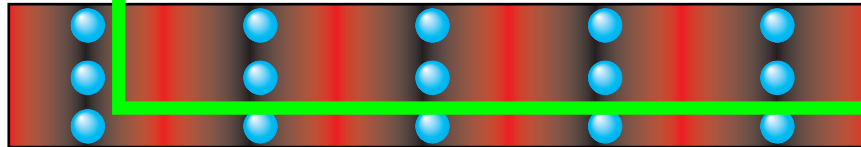
PHYSIQUE CLASSIQUE



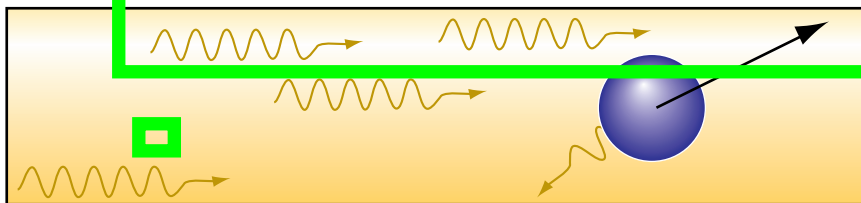
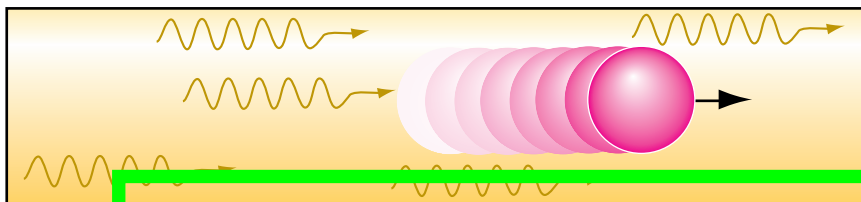
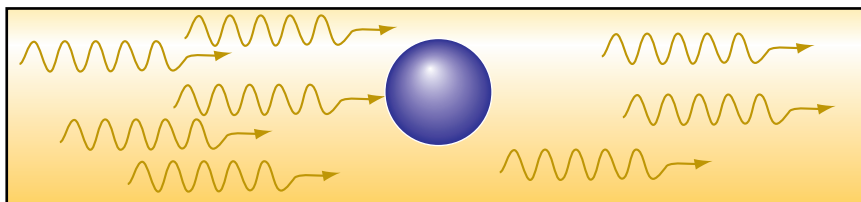
$$\text{LOI D'OHM} \\ U = RI$$



PHYSIQUE QUANTIQUE



3. LA LOI D'OHM stipule que l'intensité d'un courant électrique dans un conducteur cristallin est proportionnelle à la différence de potentiel appliqué. Cette relation suppose que les électrons sont des particules qui se déplacent toutes dans le même sens, sous l'action des forces électriques. Toutefois le physicien Félix Bloch, utilisant la physique quantique, a déterminé que chaque électron est délocalisé dans tout le conducteur, avec une probabilité de présence supérieure entre les noyaux d'atomes (en rouge sur le schéma inférieur). Il a prévu que les électrons oscillent, leur ensemble créant un courant alternatif, quand on applique une différence de potentiel pourtant continue aux bornes du cristal : un cristal parfait ne conduit donc pas le courant électrique.



4. LA PRESSION DE RADIATION D'UN FAISCEAU LASER pousse les atomes dans son sens de propagation. Un atome absorbe un photon et recule en raison de la conservation de la quantité de mouvement. Après un bref instant, il réémet ce photon dans n'importe quelle direction et recule à nouveau. Puis il absorbera à nouveau un photon, et ainsi de suite. En moyenne, l'atome est accéléré dans le sens du faisceau.

chaque électron n'effectue qu'une partie infime de l'oscillation avant d'entrer en collision. Il se comporte alors comme un électron libre qui, entre deux chocs, se déplace en ligne droite dans la direction du champ électrique. Globalement, tous les électrons bougent dans le même sens, induisant un courant électrique constant.

Dans les échantillons étudiés en laboratoire, on observe que la durée moyenne d'évolution libre, entre deux chocs successifs, nommée temps de relaxation, est considérablement plus courte que la période d'oscillation : avec des champs électriques de quelques dizaines de volts par mètre, la période de Bloch dans un métal est de l'ordre du millionième de seconde, et le temps de relaxation est dix millions de fois inférieur.

C'est la raison pour laquelle, pendant plus de 50 ans, les oscillations de Bloch sont restées inobservées. Décrites dans tous les manuels de physique des solides, ces oscillations semblaient ne devoir rester qu'une expérience de pensée.

Les super-réseaux

Comme souvent en physique, l'apparition de nouveaux dispositifs expérimentaux a conduit au but : ici, l'observation des oscillations prédites. Le premier progrès est venu de la physique des semi-conducteurs : ce fut la mise au point des « super-réseaux ». Dans ces systèmes, ce sont toujours des électrons qui oscillent, mais avec des périodes de l'ordre de la picoseconde (un millième de milliardième de seconde), bien plus courtes que dans les solides cristallins.

D'autre part, les progrès réalisés dans le domaine du refroidissement et de la manipulation d'atomes par laser ont engendré de nouveaux systèmes expérimentaux qui permettent d'aborder les problèmes de transport dans les potentiels périodiques. Dans les systèmes atomiques, les processus de relaxation peuvent être rendus négligeables, et les périodes de Bloch sont bien plus longues, supérieures à la milliseconde.

Les super-réseaux, tout d'abord, sont apparus dans les années 1970 : les physiciens du solide ont appris à utiliser des techniques d'évaporation sous vide pour déposer des couches atomiques spécifiques sur un support, et réaliser des structures de composition périodique dont ils savent régler le pas. Les pas obtenus sont d'une dizaine de nanomètres,

soit 100 fois supérieurs à la maille d'un réseau cristallin.

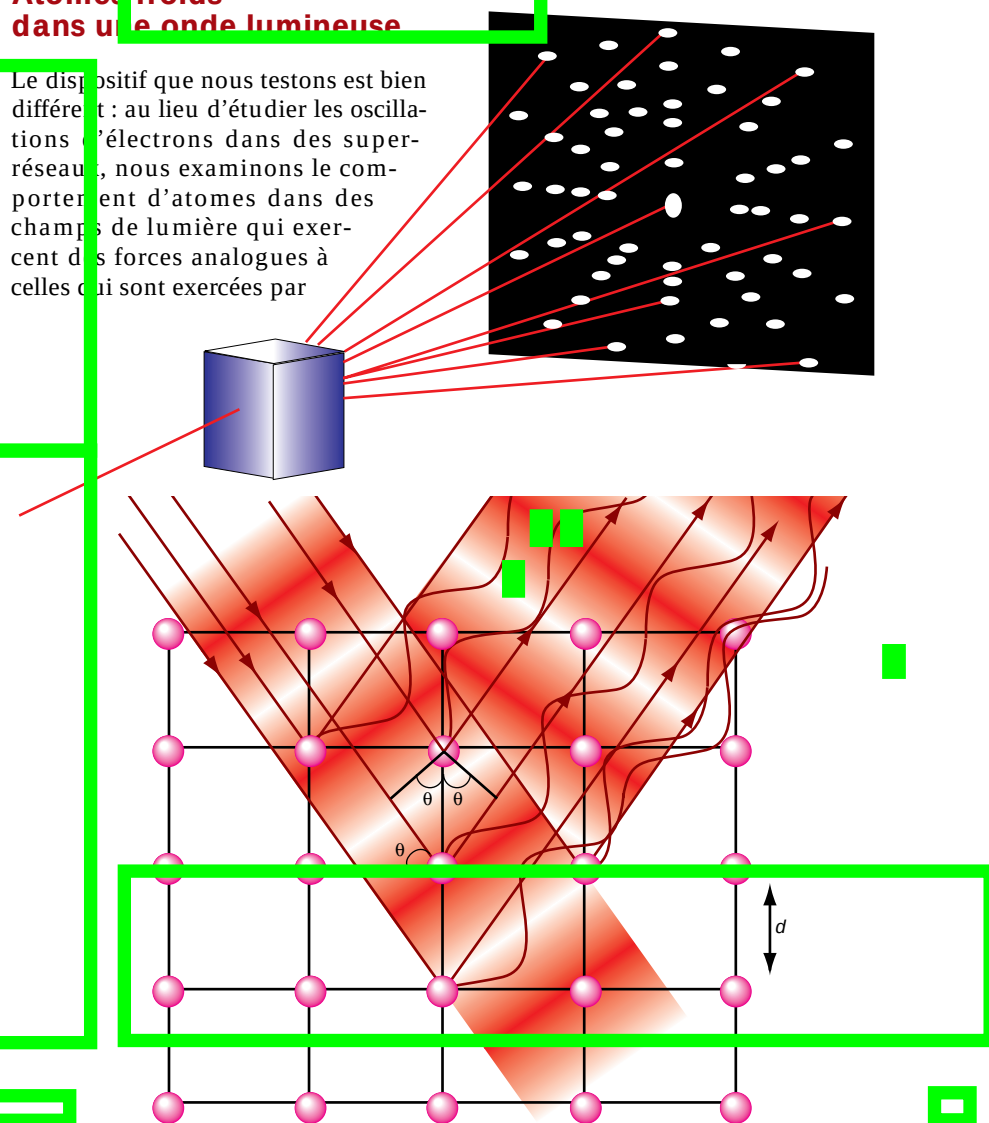
Dans les super-réseaux, les champs électriques peuvent être considérables (plusieurs centaines de millions de volts par mètre). De ce fait, la période des oscillations de Bloch (inversement proportionnelle à la force électrique et au pas du réseau) est réduite au point qu'elle devient alors inférieure au temps de relaxation, ce qui laisse apparaître le comportement oscillant. En 1992, les oscillations de Bloch électroniques ont été ainsi observées à une fréquence de plusieurs térahertz (milliers de milliards de hertz). Des études récentes ont précisé les observations.

Atomes froids dans une onde lumineuse

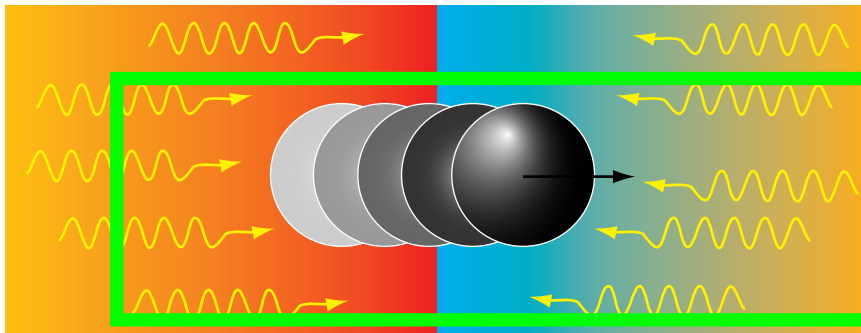
Le dispositif que nous testons est bien différent : au lieu d'étudier les oscillations d'électrons dans des super-réseaux, nous examinons le comportement d'atomes dans des champs de lumière qui exercent des forces analogues à celles qui sont exercées par

le réseau cristallin sur les électrons. Nous produisons des atomes ultrafroids dans des suits de lumière à l'aide de techniques de refroidissement d'atomes mises au point depuis une quinzaine d'années par Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji et William Phillips (ce travail leur a valu le prix Nobel de physique en 1997).

Dans les expériences de refroidissement par laser, on utilise des photons (ou grains de lumière) pour exercer des forces sur les atomes : lorsqu'un atome absorbe ou émet un photon, sa vitesse est modifiée (d'une valeur nommée vitesse de recul), de sorte que la quantité de mouvement totale est conservée. Dans le cas d'atomes de césium



5. DES ONDES LUMINEUSES sont diffractées par un réseau régulier (en haut). William Henry Bragg et William Lawrence Bragg ont calculé pourquoi un cristal irradié par des rayons X ne diffracte que dans des directions particulières : la diffraction n'a lieu que pour les directions telles que les ondes réémises sont en phase. Comme la différence de marche entre deux rayons lumineux réémis par des plans successifs du réseau est égale à $2d \sin \theta$, la diffraction n'a lieu que pour les angles θ tels que $2d \sin \theta$ soit égal à un multiple entier de longueurs d'onde. Cet effet se retrouve pour des ondes de matière piégées dans un réseau de lumière.



6. PRINCIPE DU REFROIDISSEMENT DOPPLER. On atomise le césium par deux faisceaux laser identiques mais qui se propagent en sens inverses. La fréquence des lasers est choisie légèrement inférieure à la fréquence qu'absorbent les atomes au repos. Quand un atome bouge, il voit la fréquence de l'onde opposée à son mouvement augmentée (décalée vers le bleu pour la lumière visible, moitié droite de l'image) : il absorbe alors les photons de cette onde. Inversement, il voit le faisceau qui se propage dans le même sens que lui est vu à une fréquence inférieure (lumière décalée vers le rouge (à gauche)) : l'atome absorbe beaucoup moins les photons de ce faisceau. Ainsi apparaît un déséquilibre entre les pressions de radiation des faisceaux, ce qui ralentit l'atome. Ce mécanisme est très efficace. À trois dimensions, les atomes ainsi refroidis restent englués dans les faisceaux et forment une mélasse optique.

éclairés par de la lumière à une longueur d'onde égale à 0,852 micromètre, la vitesse de recul est de 3,5 millimètres par seconde.

Toutefois un nuage d'atomes froids n'est pas homogène : c'est précisément la répartition des vitesses des différents atomes du nuage qui détermine la température : plus les vitesses des divers atomes du nuage sont différentes, plus la température est élevée. Or cette diversité des vitesses atomiques est associée par la mécanique quantique à une indétermination sur la position des particules : c'est ce que l'on nomme la longueur de cohérence. Celle-ci correspond à la distance sur laquelle le centre de masse d'un atome du nuage est délocalisé, c'est aussi la dimension de la zone sur laquelle les propriétés ondulatoires du paquet d'onde atomique peuvent se manifester.

En refroidissant un gaz d'atomes, on sait préparer des échantillons tels que la longueur de cohérence soit supérieure à la longueur d'onde utilisée pour refroidir les atomes. Cette propriété ouvre la voie à de nouvelles expériences. Dans notre laboratoire, nous avons obtenu par refroidissement laser une température de seulement trois nanokelvins (deux milliardièmes de degré au-dessus du zéro absolu, égal à $-273,15^\circ\text{C}$), qui correspond à une longueur de cohérence de sept micromètres, bien supérieure à la longueur d'onde utilisée, égale à 0,85 micromètre.

En pratique, pour préparer un paquet d'atomes ultrafroids, nous procédons en deux étapes que nous allons examiner : d'abord nous capturons 100 millions d'atomes de césium dans

une cellule à l'aide d'un piège magnéto-optique qui les confine dans un volume de quelques millimètres cubes et les refroidit jusqu'à une température de cinq microkelvins ; comme cette température est encore bien trop élevée pour observer les oscillations de Bloch, nous utilisons ensuite une technique de « refroidissement subrecul », avec laquelle nous obtenons une température de 12 nanokelvins.

Dans le piège magnéto-optique (voir la figure 1), la capture des atomes est assurée par le refroidissement Doppler, proposé en 1975 par Theodore Hänsch et Arthur Schawlow, de l'Université de Stanford. Ce refroidissement englué les atomes dans le volume de recouvrement des faisceaux, que l'on nomme mélasse optique. L'idée est de régler la fréquence des lasers, de sorte qu'ils n'apportent pas une énergie exactement égale à la différence entre le niveau fondamental et le premier niveau excité de l'atome, mais légèrement inférieure.

Examinons le principe de l'expérience à une dimension. Si l'atome est au repos, les deux pressions de radiation des faisceaux opposés sont égales, et elles se compensent parfaitement. Si l'atome bouge, il voit la fréquence du faisceau opposé à son mouvement augmentée à cause de l'effet Doppler (tout comme le son d'une ambulance qui s'approche de nous paraît plus aigu) et il absorbe davantage de photons. En revanche, il absorbe moins le faisceau qui se dirige dans la direction de son propre mouvement, car l'effet Doppler réduit l'énergie des photons vus par l'atome. Il s'ensuit un déséquilibre entre les deux

pressions de radiation opposées, et la vitesse de l'atome est amortie à une dizaine de centimètres par seconde.

Un autre type de refroidissement, encore plus efficace, prend alors le relais, en baissant la température de la mélasse optique à cinq microkelvins, bien au-dessous de la limite obtenue par refroidissement Doppler. Variante astucieuse de la mélasse optique, ce mécanisme a été proposé théoriquement en 1986 par notre ami Jean Dalibard et mis en œuvre pour la première fois en 1987 par les équipes de Steven Chu et David Pritchard : un champ magnétique non homogène dans l'espace (appliqué par les deux bobines, de part et d'autre de la cellule) et des polarisations convenables pour les faisceaux de mélasse permettent de créer, outre la force de viscosité décrite précédemment, une force de rappel vers le point où le champ magnétique est nul, au centre des faisceaux. Cette force accumule les atomes froids dans un volume de quelques millimètres cubes.

Enfin on coupe le piège et on procède au refroidissement subrecul. Dans ce cas, l'effet (optique) est analogue à celui que l'on obtient quand on fait vibrer une plaque sur laquelle on a versé une poudre légère : les particules de la poudre s'accumulent aux endroits où la plaque ne vibre pas. Dans nos montages, ce sont les atomes qui s'accumulent à très faible vitesse à une température de 12 nanokelvins. L'étude des oscillations de Bloch avec les atomes peut commencer.

Les oscillations d'atomes ultrafroids

Les atomes refroidis permettent de sonder les propriétés des potentiels qui varient sur une distance de l'ordre de la longueur d'onde des lasers. Par exemple, quand on illumine un nuage d'atomes avec deux faisceaux lasers opposés, de même longueur d'onde, les atomes sont soumis à un potentiel lumineux (l'analogue du potentiel électrique qui agit sur les électrons dans un conducteur) qui est proportionnel à l'intensité de la lumière divisée par le désaccord, c'est-à-dire la différence d'énergie entre la lumière laser et la longueur d'onde qu'absorberaient les atomes (cette fois, on choisit un désaccord très grand). En raison de l'interférence entre les deux faisceaux laser opposés, l'intensité du potentiel lumineux est périodique, et la période est la moitié de la période de l'onde lumineuse.

Toutefois, nous avons vu que les atomes qui absorbent les photons les réémettent dans une direction aléatoire. Ce phénomène est gênant, car il conduit à une dispersion des vitesses atomiques qui rend la longueur de cohérence inférieure au pas du réseau lumineux. Il joue le même rôle pour les atomes que les collisions avec les défauts pour les électrons dans un cristal. Toutefois, la cadence des processus d'émission spontanée est proportionnelle à l'intensité lumineuse et inversement proportionnelle au carré du désaccord. On peut donc la réduire en augmentant le désaccord. Dans l'expérience que nous avons effectuée, nous utilisons des faisceaux tels que l'émission spontanée ne soit que d'un photon toutes les 250 millisecondes, ce qui est un temps bien supérieur à la durée de l'expérience (25 millisecondes environ).

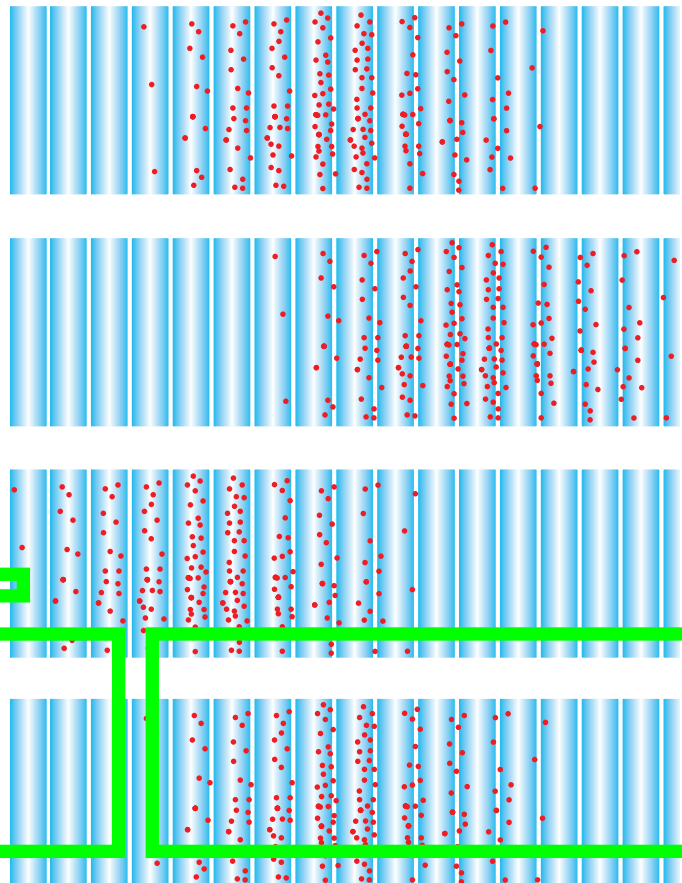
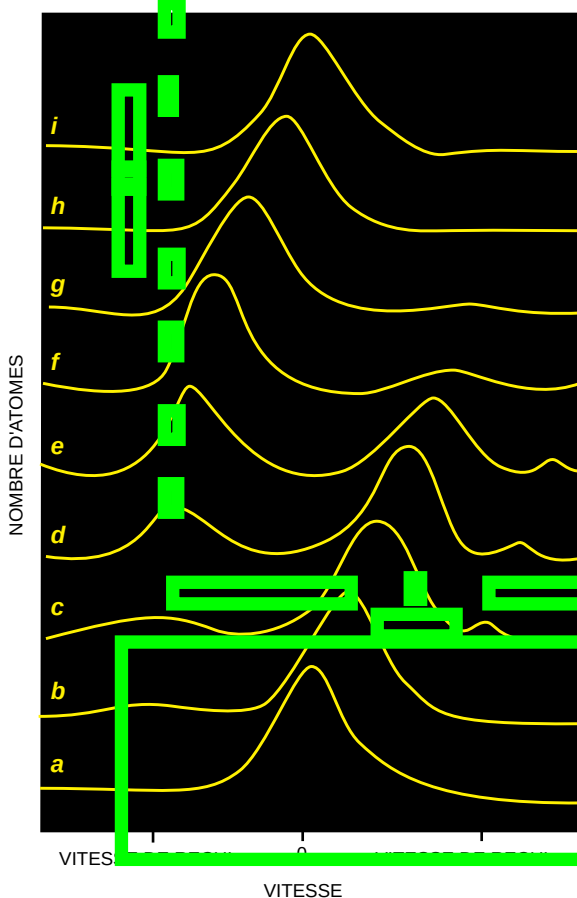
Le comportement de ces atomes froids ressemble ainsi beaucoup à celui

des électrons dans un potentiel périodique sans défaut. En outre, les nuages d'atomes refroidis présentent de nombreux avantages. D'une part, le potentiel qui agit sur les atomes est induit par une onde lumineuse stationnaire, de sorte qu'il est parfaitement périodique, sans défaut, et ne contient aucune impureté. D'autre part, on contrôle très bien l'amplitude et la présence du potentiel (contrairement au potentiel ionique des cristaux, l'expérimentateur l'allume ou l'éteint à sa guise). Grâce au refroidissement sub-recool, l'état initial du système est connu très précisément. Enfin, à la différence des électrons, les atomes (électriquement neutres) n'interagissent pas entre eux, aux densités considérées.

Dans les expériences que nous avons effectuées avec Ekkehard Peik, Jakob Reichel, Isabelle Bouchoule et Yvan Castin, les atomes sont initialement refroidis pendant une dizaine de millisecondes jusqu'à 12 nanokelvins. À cette

température, les vitesses des atomes sont inférieures à 0,87 millimètre par seconde. On allume alors l'onde stationnaire, c'est-à-dire que l'on applique le potentiel stationnaire en éclairant le nuage par deux lasers opposés, et l'on observe le paquet d'onde sur huit périodes spatiales.

Puis on applique une force constante afin d'accélérer les atomes pendant un temps variable, et l'on coupe ensuite brusquement la lumière de l'onde stationnaire, pour mesurer la répartition des vitesses des atomes. Les atomes de césium étant des particules neutres, on ne peut appliquer un champ électrique homogène pour produire une force constante comme pour les électrons. On peut utiliser la force de pesanteur, comme l'ont fait des physiciens de l'Université Yale après nos expériences, mais, à Paris, nous avons préféré produire une force artificielle, d'origine inertielle, ajustable à volonté : dans l'un des bras de



7. LES OSCILLATIONS DE BLOCH ont été observées au nuage d'atomes ultrafroids piégés dans un réseau de lumière. On a mesuré (à gauche) la probabilité qu'ont les atomes d'avoir une vitesse particulière en fonction du temps à partir duquel on applique une force. Par exemple, la courbe inférieure, en forme de cloche (a), indique que la plupart des atomes sont initialement immobiles. Sous l'action de la force, la répartition des vitesses se décale vers la droite jusqu'à une valeur particulière, nommée vitesse de recul (b à d). Au voisinage de cette valeur, l'onde de matière associée aux atomes est réfléchiée et la

répartition des vitesses se dédouble (e) : chaque atome a une probabilité d'être réfléchi qui augmente progressivement. Finalement la totalité de l'onde de matière est réfléchiée (f à h). Après une période complète de huit millisecondes (i), on retrouve la répartition initiale des vitesses. Les oscillations de Bloch sont la répétition de ce phénomène. À droite, on a représenté le mouvement correspondant de l'onde de matière dans le réseau de lumière, de période égale à 0,47 micromètre : c'est également une oscillation, mais dans l'espace.

l'onde stationnaire, nous avons introduit un décalage de fréquence variable. Plus précisément, en changeant la fréquence de la lumière dans une des directions, on modifie la figure d'interférence, donc le potentiel. Ainsi la lumière n'est stationnaire que dans un référentiel qui se déplace à vitesse uniformément accélérée. Or, selon le principe de relativité, les atomes sont soumis dans ce référentiel à une force d'inertie constante, en plus du potentiel périodique. Cette force se règle aisément, et c'est ainsi que nous avons observé des périodes de Bloch variables, comprises entre une et huit millisecondes.

Le résultat essentiel est présenté sur la figure 7. Initialement les atomes forment un nuage dont les vitesses sont nulles en moyenne : le nuage est immobile. Puis on applique la force, et les atomes sont mis en mouvement. Lorsque la vitesse approche une valeur qui satisfait la condition de Bragg

(vitesse égale à la vitesse de recul), l'onde de matière se dédouble ; une autre onde apparaît, symétrique de la première. Elle se propage donc à une vitesse opposée. Progressivement la première onde s'atténue au profit de l'onde symétrique, qui correspond à une réflexion de la première onde. Après une période de Bloch exactement, on retrouve la répartition initiale des vitesses : le nuage est à nouveau immobile. Si la force appliquée demeure, le phénomène oscillatoire se répète : nous avons observé jusqu'à une centaine d'oscillations successives.

L'effet observé est une réflexion de Bragg de l'onde atomique par le potentiel optique. L'onde de matière est réfléchiée par la structure lumineuse périodique, c'est-à-dire une situation symétrique de la réflexion de Bragg ordinaire, où l'onde lumineuse est réfléchiée par une structure matérielle périodique.

À l'oscillation des vitesses correspond naturellement une oscillation de

la position moyenne des atomes. Dans nos expériences, l'amplitude de ce mouvement est de quelques micromètres, de sorte que la position moyenne s'étend sur plusieurs périodes du potentiel. En pratique, cet effet reste néanmoins difficile à observer, car il est masqué par la répartition initiale du nuage.

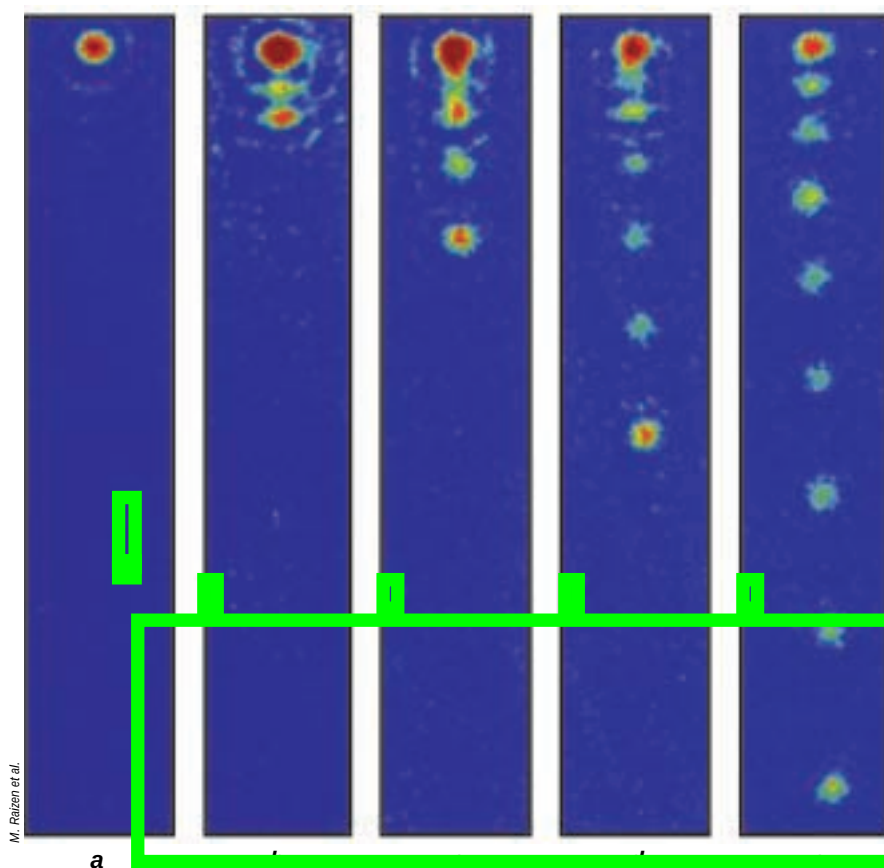
Les expériences d'Austin

Ces expériences montrent l'intérêt des atomes pour l'étude des propriétés de transport dans les réseaux. Les systèmes atomiques ont également été utilisés par Mark Raizen et ses collègues de l'Université d'Austin, qui ont mis en évidence les échelles de Wannier-Stark atomiques. Cet effet est la contrepartie des oscillations de Bloch, mais dans l'espace des fréquences : les atomes deviennent capables d'absorber ou d'émettre de l'énergie à des fréquences qui sont des multiples de l'inverse de la période de Bloch.

L'existence d'une telle échelle fut initialement controversée, et elle n'a été établie qu'à la fin des années 1980. La méthode employée par l'équipe d'Austin est d'ajouter au potentiel périodique (les ondes stationnaires lumineuses) une faible modulation de phase sinusoïdale, qui le fait vibrer à une fréquence ajustable. Les atomes sont d'abord préparés dans leur niveau d'énergie inférieure, puis on accélère le potentiel afin de produire la force constante et l'on mesure la proportion d'atomes entraînés par ce potentiel.

Lorsque la fréquence de la faible modulation du potentiel correspond à l'écart en énergie des niveaux de l'échelle de Wannier-Stark, les atomes passent dans des états d'énergie supérieure, et ils ne sont plus entraînés par le potentiel. L'équipe d'Austin observe alors une forte raréfaction d'atomes qui ont survécu à l'accélération imposée. Les autres atomes sont « semés le chemin ». Lorsque la fréquence de la modulation n'est pas résonnante, il n'y a pas de perte d'atomes.

Enfin, avec les mêmes types de systèmes atomiques, les équipes de Paris et de Yale ont étudié les processus de fuite nommés transition de Landau-Zener, qui est équivalente aux phénomènes de claquage électrique : pour chaque oscillation de Bloch, il existe une probabilité que l'atome ou l'électron soit transmis au lieu d'être réfléchi. Cette probabilité dépend de la force appliquée et de la profondeur du



8. CE LASER À ATOMES est pulsé à la fréquence de Bloch. Un nuage d'atomes de rubidium formant un condensat de Bose-Einstein (a) est placé dans un réseau de lumière vertical (non représenté), on obtient alors une onde de matière délocalisée sur un grand nombre de minima du potentiel. L'intensité de ce potentiel lumineux est ajustée de sorte que, par effet tunnel, une partie des ondes de matière fuit à travers les maxima de potentiel et tombe sous l'effet de la gravité. Ces ondes de matière toutes émises en phase par les minima interfèrent de façon constructive à des intervalles de temps réguliers, séparés par la période de Bloch (b, c, d, e). L'espacement croissant des paquets atomiques résulte de l'accélération de la pesanteur. Pour visualiser les bouffées d'atomes, on mesure sur une caméra numérique comment elles absorbent un faisceau laser.

potentiel. On découvre alors que le claquage apparaît pour des valeurs de la force bien inférieure à celles que l'on calcule en considérant les atomes comme de petites billes «classiques».

Dans une expérience récemment menée à l'Université Yale, Mark Kasevich et ses collègues ont montré une spectaculaire application de ces oscillations de Bloch aux condensats de Bose-Einstein. La condensation de Bose-Einstein est un phénomène prédit par le physicien indien Satyendranath Bose et par Albert Einstein, en 1925, qui consiste en une accumulation d'un grand nombre d'atomes dans un même état quantique : l'état fondamental du piège. Tous les atomes perdent alors leur individualité et forment une sorte de «super-atome», ayant la même position, la même vitesse et, plus généralement, toutes leurs propriétés physiques identiques. Leur température est alors extrêmement basse.

Un laser à atomes

Les physiciens de Yale ont placé un condensat d'atomes de rubidium dans une onde stationnaire laser verticale. Dans ce cas, la gravité joue le rôle de la force constante qui était induite de manière artificielle dans les expériences précédentes. Les atomes effectuent alors des oscillations de Bloch dans le réseau lumineux et restent confinés dans des sites espacés d'une demi longueur d'onde. En réduisant l'intensité lumineuse, on laisse fuir, par effet tunnel, une faible partie des ondes de matière, qui tombe sous l'action de la gravité. Chaque site se comporte alors comme un petit émetteur d'ondes de matière. Issus d'un même condensat de Bose-Einstein, tous ces émetteurs individuels sont initialement en phase. Ces ondes interfèrent alors constructivement à des instants précis, séparés par la période de Bloch. On obtient un laser à atomes

pulsé, c'est-à-dire une source d'atomes cohérente et brillante (les lasers classiques ont des sources cohérentes et brillantes de photons).

Les oscillations de Bloch des électrons et des atomes diffèrent par bien des ordres de grandeur. Les physiciens s'émervent que des systèmes aussi distincts que des atomes dans un champ lumineux et des électrons dans un solide aient des comportements similaires. La similitude des comportements corrobore l'universalité des lois de la physique quantique, et la dualité onde-particule.

Les applications des oscillations de Bloch sont nombreuses. Nous avons proposé, tout d'abord, d'utiliser la formule de Bloch pour déterminer précisément le rapport h/m : la période des oscillations de Bloch est égale à $2h/mg\lambda$, où h est la constante de Planck, m la masse de l'atome que l'on fait osciller et λ la longueur d'onde du laser qui crée le potentiel périodique. On peut aussi mesurer g , l'accélération de la pesanteur. Notre collègue François Birabeau prépare cette expérience.

La méthode où l'onde stationnaire est balayée en fréquence permet aussi d'accélérer un gaz d'atomes ultrafroids sans le réchauffer. On pourra l'utiliser pour réaliser une fontaine atomique à partir d'un condensat de Bose-Einstein. De nombreuses autres situations peuvent être étudiées. En modifiant la configuration des faisceaux lumineux, on peut créer des potentiels plus complexes que ceux d'ondes stationnaires. On peut ainsi étudier le transport quantique des particules dans des potentiels quasi-périodiques ou désordonnés.

Enfin, on peut introduire des processus de relaxation contrôlés et, ainsi, étudier la transition entre les régimes quantiques et classiques. Tous ces exemples montrent que les atomes froids devaient apporter un éclairage nouveau sur le transport quantique.

Ce magazine vous intéresse !



Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actuelles
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'espace
- ☐ Le texte intégral des conférences du samedi
- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires
- ☐ Le programme de la découverte

Je joins mon règlement à la

REVUE DU PALAIS DE LA
DÉCOUVERTE

Je joins mon règlement par chèque

à l'ordre de

PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
(COP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)

Tarif étranger : 200 F

par mandat international uniquement
(par avion, supplément de 80 FF)

Abonnement de soutien : 100 F

Nom (M., Mme, Mlle)

Prénom :

Adresse :

.....

Ville :

Code postal :

Profession :

à retourner avec votre règlement à
Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.
Tél. : 01 40 74 80 00

Christophe SALOMON est directeur de recherche au Laboratoire Kastler-Brossel, à l'École normale supérieure de Paris. Maxime DAHAN est actuellement au Laboratoire Lawrence Berkeley, à Berkeley.

Felix BLOCH, *Zeitschrift für Physik*, vol. 52, p. 555, 1929.

Clarence ZENER, *Proceedings of Royal Society London Ser.*, A145, p. 523, 1934.

E. MENDEZ et G. BASTARD, *Physics Today*, vol. 46, p. 34, 1993.

M. BEN DAHAN, E. PEIK, J. REICHEL, Y. CASIN et C. SALOMON, *Physics Review Letters*, vol. 76, p. 4 508, 1996.

S.R. WILKINSON, C.F. BHARUCHA, K.W. MADISON, Q. NIU et M.G. RAIZEN, *Physics Review Letters*, vol. 76, p. 12 122, 1996.

B.P. ANDERSON et A.M. KASEVICH, *Science*, vol. 282, p. 1686, 1998.

M. RAIZEN, C. SALOMON et Q. NIU, *New Light on Quantum Transport*, in *Physics Today*, 30 juillet 1997.



La couleur des oiseaux

MAURICE POMARÈDE

L'absorption de la lumière par les plumes, et les interférences de la lumière réfléchie sur leurs structures, engendrent les vives couleurs du paon, de la perruche, du colibri...

Les deux caractéristiques les plus admirables des oiseaux sont évidemment leurs couleurs et leurs chants. Ces deux qualités sont inégalement réparties : nombre d'oiseaux, tels les perroquets, les paons, les paradisiers, ont une voix sans attrait ; inversement les plus grands chanteurs, les fauvettes, les rossignols, ont une piètre apparence. Très rares sont ceux qui, tel le chardonneret, cumulent les riches couleurs et le chant mélodieux.

Qu'importe. L'évolution ne retient que l'utilité biologique : les couleurs, comme les chants, permettent aux animaux d'affirmer leur identité,

notamment au cours des parades nuptiales. C'est la raison pour laquelle on suppose que les couleurs vives conviennent surtout aux oiseaux des forêts tropicales : l'animal parade dans les clairières, exhibant ses couleurs vives, ou, au contraire, peut se tapir dans l'ombre, où ses couleurs s'éteignent, afin d'éviter les prédateurs.

Remarquablement variées, les couleurs sont toujours dues à des pigments et à des structures simples des plumes. Les pigments se mettent en place au cours de la mue, et ils contribuent directement ou indirectement aux couleurs des plumes : soit ils absorbent une partie de la lumière, soit ils diffractent la lumière. Nous verrons que

l'étude au microscope, optique ou électronique, révèle les mécanismes optiques mis en jeu.

Les pigments des oiseaux

Les organismes des oiseaux contiennent essentiellement deux types de pigments. Les uns sont des caroténoïdes, dont le plus connu est le bêta carotène (qui colore les carottes en rouge). Les oiseaux se les procurent en mangeant des végétaux et de petits animaux qui en contiennent. Ainsi le rouge des ailes des flamants provient d'un caroténoïde élaboré par une algue (*Dunaliella*) des lagunes ou des marais salants ; ces algues, qui rendent les eaux rougeâtres, sont consommées par de petites crevettes (*Artemia*), qui sont ensuite mangées par les flamants. Les caroténoïdes sont transformés chimiquement par l'organisme des flamants et fixés dans les plumes. Ils sont responsables des couleurs rouge, orangé, jaune, crème, selon leur nature chimique exacte et selon leur concentration dans les plumes.

Les autres couleurs du plumage sont dues aux mélanines. Brunes ou noires, ces protéines sont synthétisées par la peau et mises en place dans les plumes en croissance par des cellules nommées mélanocytes. La répartition des mélanines, très précise, conduit à de nombreuses variétés.

On connaît assez bien la synthèse des mélanines, dont le composé initial est un acide aminé, la tyrosine. Une chaîne de réactions chimiques conduit à la formation d'un polymère, l'eumélanine, ou mélanine noire. Quand



Photographies de Maurice Pomarède

1. LE PAON doit ses couleurs à la présence d'un pigment noir : la mélanine. En l'absence de ce pigment, il est blanc.

la polymérisation n'a pas lieu, des mélanines plus simples sont formées : ces phaeomélanines engendrent des couleurs allant du brun au roux.

Les mélanines sont à l'origine des couleurs des cheveux et des poils des mammifères. Les cheveux blanchissent quand la mélanine est absente ou dégradée. En s'associant à d'autres

molécules, les mélanines sont à l'origine de couleurs variées. Ainsi la robe du paon, que le mâle déploie en faisant la roue, les irisations du cou des pigeons ou des ailes du corbeau dépendent de la seule mélanine. Qu'une mutation l'élimine, et le paon, le pigeon ou le corbeau blanchissent (voir la figure 1).

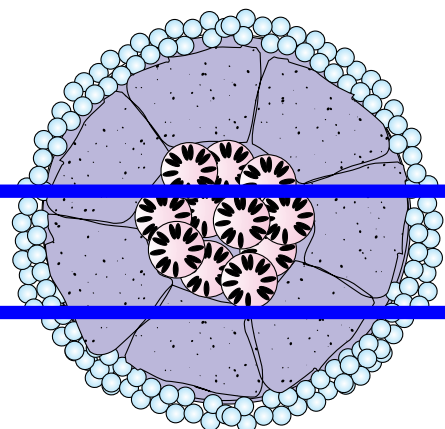
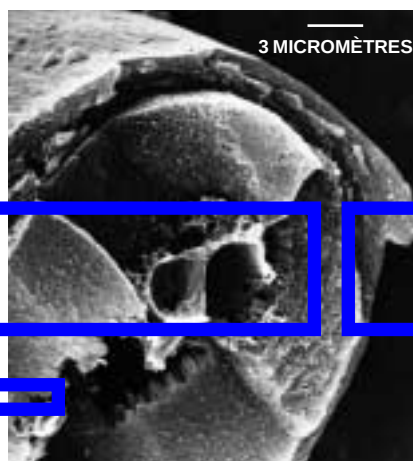
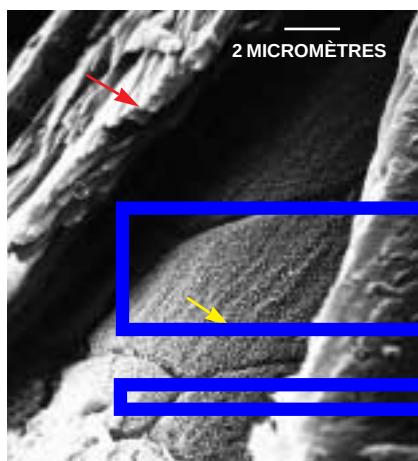
Les couleurs structurales des perruches

Les couleurs des oiseaux résultent toujours d'une décomposition de la lumière solaire ; plusieurs mécanismes sont possibles. Le premier est l'absorption d'une partie de la lumière par les pigments évoqués précédemment :



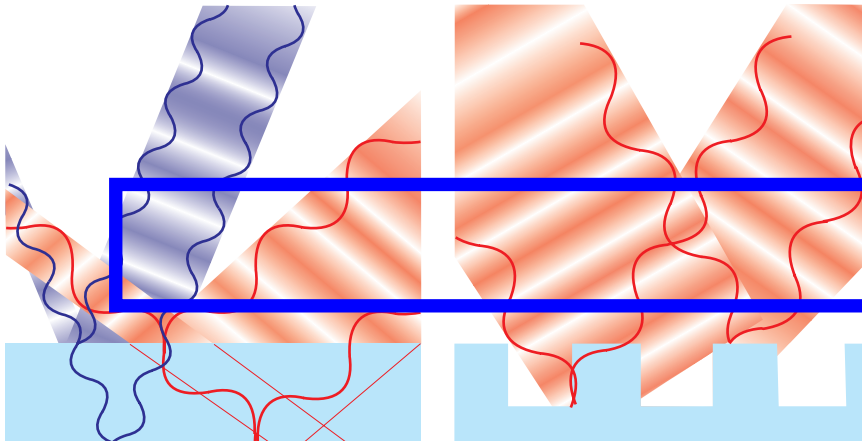
2. PLUME BLEUE D'UNE PERRUCHE : la couleur bleue est donnée par les barbes des plumes. Avec des barbules blanches, on voit

un bleu clair. Ce bleu devient plus foncé quand de la mélanine noire envahit les barbules.

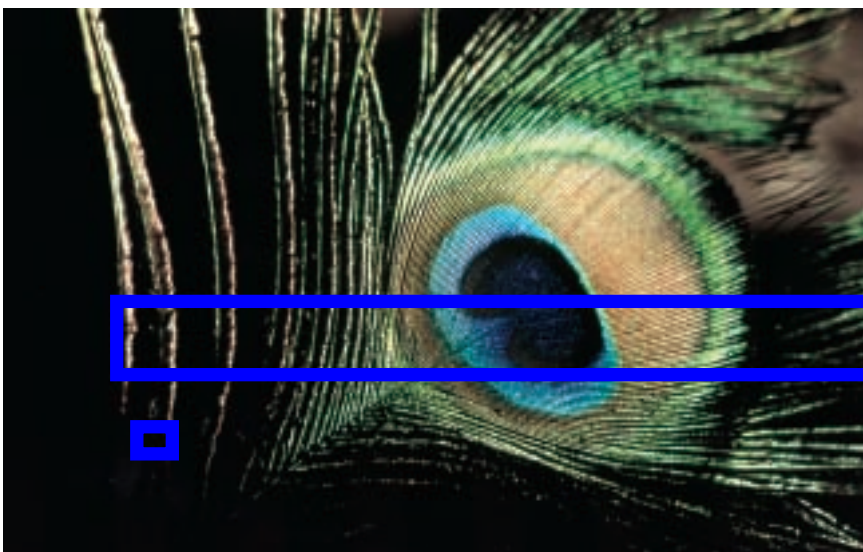
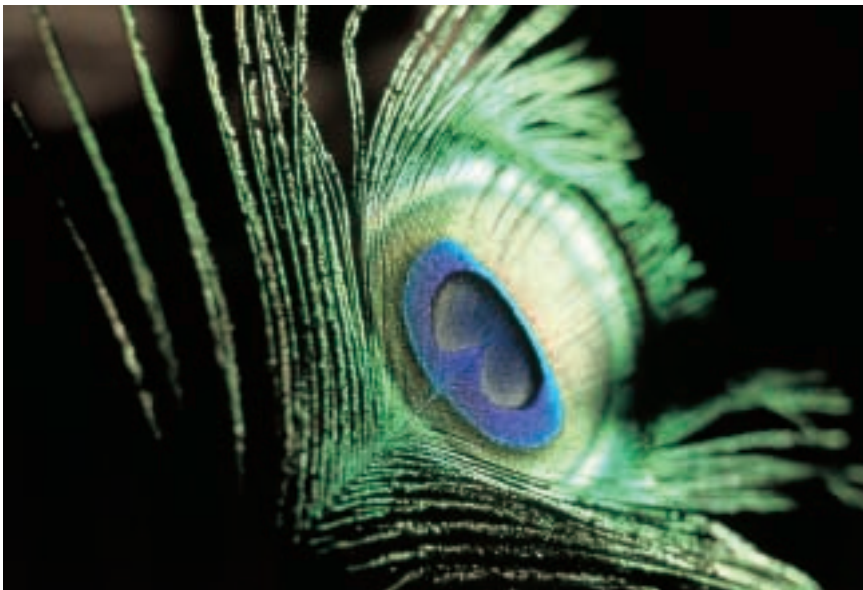


3. CETTE ÉCORCE DE BARBE de plume de perruche (flèche rouge à gauche) est déchirée : elle laisse apercevoir la couche « structurale », composée de cellules géantes (flèche jaune). Leurs granulosités sont dues aux « microgranules » de mélanine. Des restes de membranes subsistent dans le bas de la photographie. À droite, cette

section de barbe d'une plume du même type montre l'écorce, composée de cellules très minces (en bleu clair sur le schéma), la couche de cellules géantes (en violet sur le schéma), et la moelle, composée de cellules rondes (en rose) qui enferment, sous leur membrane, des macromolécules d'eumélanine noire.



4. LA LUMIÈRE réfléchi par la face supérieure d'une lame mince (à gauche) ou d'un réseau (à droite) interfère avec la lumière réfléchi par la face inférieure. Les interférences ne sont constructives que dans certaines directions, qui dépendent de la longueur d'onde. Ce phénomène explique certaines couleurs des plumes d'oiseaux. La présence de mélanine en profondeur supprime les rayons diffractés et évite la recombinaison avec la lumière qui interfère.



5. LES COULEURS D'UNE PLUME DE PAON résultent de sa structure finement divisée. Les variations des couleurs selon l'incidence de la lumière sont caractéristiques des couleurs structurales, dues aux microlamelles.

un pigment rouge, par exemple, est un corps qui absorbe une partie de la lumière solaire (le bleu et le vert, notamment) et renvoie du rouge vers notre œil.

À ces couleurs «pigmentaires» s'opposent les couleurs «structurales», qui naissent de la diffraction des rayonnements lumineux par des microstructures des plumes. Alors que les couleurs pigmentaires sont stables et souvent ternes, les couleurs structurales sont vives, et elles varient souvent selon l'incidence de la lumière. La couleur d'une plume change quand on la fait tourner dans la main : elle passe du bleu au violet, ou du rouge à l'orangé. Si le jaune du canari est d'origine pigmentaire, le bleu de la perruche ondulée et toutes les couleurs du paon sont d'origine structurale. On observe chez les oiseaux trois types de structures qui engendrent ces couleurs.

Vivante en Australie, mais fréquente en élevage, la perruche ondulée a pour couleur principale le vert, avec, aux ailes et à la queue, un dessin gris et noir donné par la mélanine. Par mutation, le vert de certains oiseaux est remplacé par du bleu, du gris, du jaune ou du violet. Comment toutes ces couleurs naissent-elles ? Examinons des sections de plumes au microscope en les éclairant sur un fond noir. Nous passerons ensuite à la microscopie électronique à balayage pour étudier les microstructures responsables des effets observés.

La micrographie de la figure 1, tout d'abord, montre clairement que le bleu naît dans les barbes. Pourquoi ce bleu, quand le seul pigment présent est le noir ou le brun ? Une micrographie électronique à balayage d'une coupe transversale montre que les barbes présentent une mince cuticule faite de cellules aplaties, une couche structurale faite de cellules géantes bourrées d'eumélanine, une moelle faite de cellules arrondies à la périphérie desquelles se trouvent des macromolécules géantes d'eumélanine. Allongées et juxtaposées, ces macromolécules forment aussi la base de la couche structurale. C'est l'eumélanine, qui donne à la moelle de plume bleue une couleur noire.

Le bleu naît dans la couche structurale. Les microgranules d'eumélanine diffusent la lumière à la manière de la fumée de cigarette : les microgranules sont si petits qu'ils ne diffusent que les plus courtes longueurs

d'onde, c'est-à-dire le bleu. Quand les barbules des plumes sont incolores, comme sur la figure 2, le bleu est clair ; quand elles sont envahies de mélanine noire le bleu est plus sombre (la lumière non diffusée étant plus absorbée). L'apparition de phaeomélanine dans les barbes et dans les barbules transforme le bleu en violet.

Enfin la présence d'un caroténoïde jaune, en surface des barbes, transforme le bleu en vert. La preuve en est apportée par les mutations qui bloquent l'accumulation du caroténoïde dans les plumes : les perruches ondulées sont alors bleues. Enfin, quand l'eumélanine disparaît, du jaune remplace le vert.

Ce système est caractéristique des psittacides (aras, perroquets, perruches...), de sorte que des mutations qui atteignent le système de couleur conduisent à des phénotypes analogues chez tous ces oiseaux. On le retrouve chez beaucoup d'autres oiseaux (geais, diamants de Gould), où la couche structurale peut être circulaire ou discontinue. Les couleurs obtenues sont lumineuses.

Les couleurs du paon

Le cas du paon, aux mille couleurs, est différent de celui de la perruche ondulée. Quand on observe une plume de paon au microscope, on voit que toutes les couleurs naissent dans les barbules des plumes. Éclairé sur fond noir, un ocellé (les taches arrondies des paons) s'illumine comme un vitrail : chaque barbule apparaît comme une succession de taches lumineuses dont les couleurs varient selon leur position et selon l'angle d'incidence de la lumière (voir la figure 5).

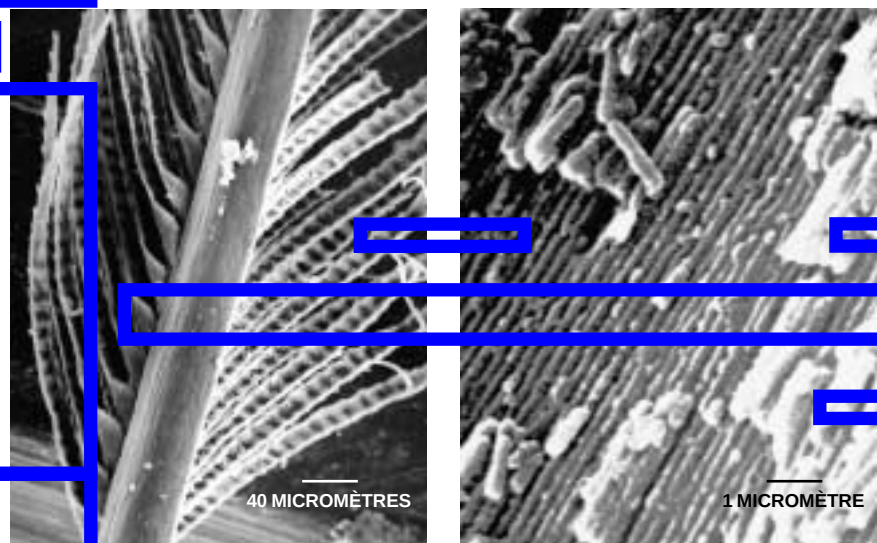
Les barbules sont d'étroites lames faites d'une succession de petites cuvette séparées par un seuil transversal. Le microscope électronique à balayage montre, au fond des cuvettes, de minces lamelles parallèles (voir la figure 6). Les microlamelles, régulièrement écartées et très nombreuses, produisent diverses couleurs, parce qu'elles provoquent des interférences : les ondes réfléchies par les lamelles successives sont décalées quand le décalage est égal à un multiple impair de demi longueurs d'onde, la couleur correspondante disparaît, ce qui renforce la couleur complémentaire. Or la distance que parcourt la lumière pour aller d'une lamelle à la suivante dépend

de la direction d'incidence. Aussi, la couleur change-t-elle avec l'angle d'observation. La mélanine absorbe la lumière qui n'est pas réfléchie et limite les réflexions dans les lamelles. Les barbules colorées reposent sur des barbules noires, et les barbes de plume sont également noires. En l'absence de mélanine noire, une recombinaison de la lumière supprime les couleurs.

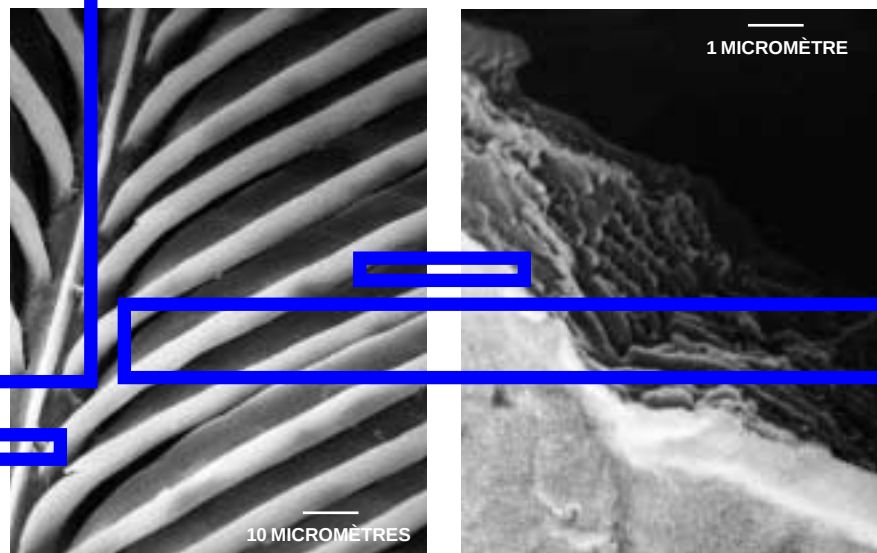
La production de couleurs par microlamelles est caractéristique des phasianidés (paons, faisans, lophophorés...) et de nombreux oiseaux aux couleurs vives (paradisiers, trogonidés, nectarinidés), mais aussi des pigeons ou des corbeaux. Ces derniers, comme les coqs, présentent des plumes où les couleurs semblent ruisseler : qu'il

s'agisse du cou du pigeon ou de l'aile du corbeau, les irisations du plumage sont dues aux microlamelles présentes dans des barbules aplaties et parallèles.

On retrouve également des microlamelles dans les plumes des colibris, mais les barbules ont alors, généralement, une forme bien différente de celle des barbules des autres oiseaux : au lieu d'être des lames aplaties, elles sont pliées sur elles-mêmes et disposées en chevrons (voir la figure 7). Les microlamelles localisées dans le feuillet dorsal des barbules produisent la couleur, le feuillet ventral l'étale et la renforce sans doute à la manière des catadioptriques. Selon l'incidence de la lumière, deux couleurs peuvent se succéder, et une poitrine peut passer d'un



6. BARBULE DE PLUME DE PAON. Chaque barbule renferme une série de cuvettes (flèche jaune). À droite, on voit les microlamelles du fond de ces cuvettes.



7. SUR LES PLUMES DE COLIBRI (à gauche), les barbules sont pliées suivant leur longueur : on voit ici la face inférieure. Les microlamelles (à droite) décomposent la lumière et engendrent les couleurs.

L'UNIVERS DES SCIENCES



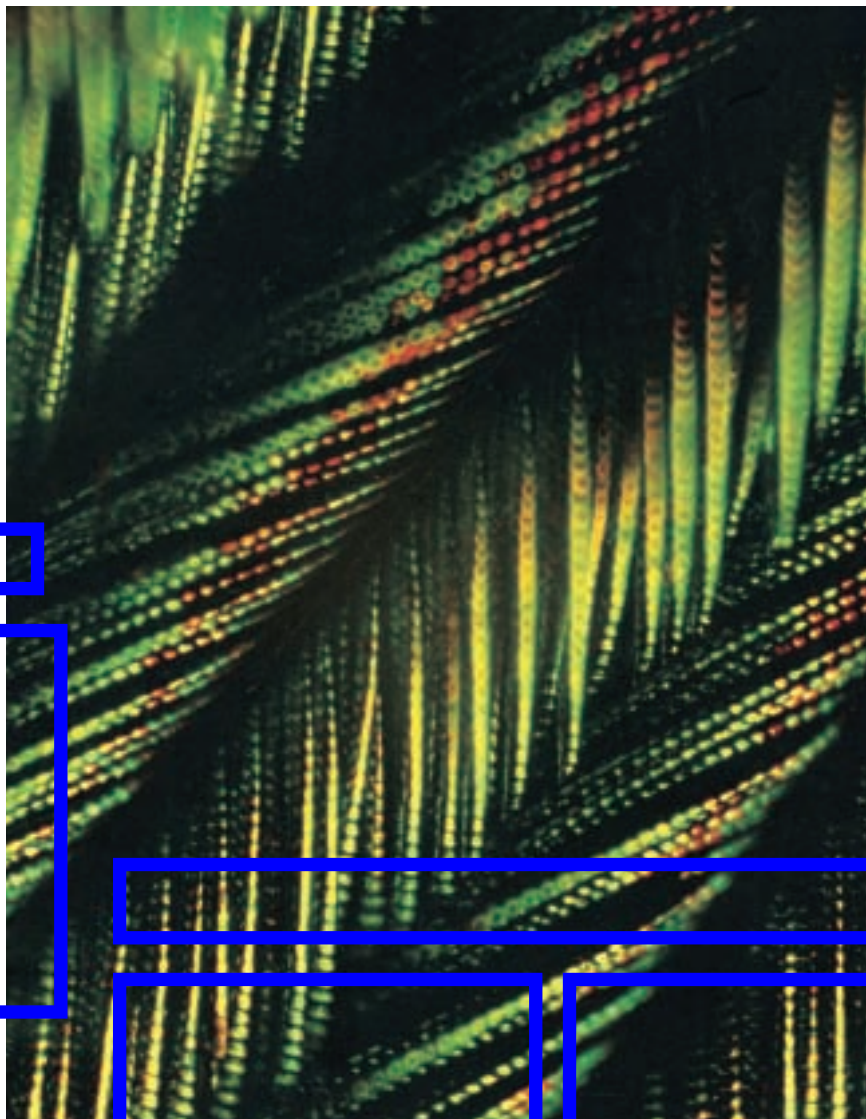
LES ÉTOILES

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



Bon de commande en p.98



8. PLUME DE PAON observée au microscope optique sur fond noir, avec un éclairage latéral blanc. Les taches colorées correspondent aux cuvettes portées par les barbuies. Les interférences sur les microlamelles des cuvettes engendrent ces couleurs.

rouge rubi à un vert émeraude. La présence d'un mélanine est indispensable pour assurer la diffusion de la lumière.

L'écartement des microlamelles est de l'ordre des longueurs d'ondes de la lumière, avec une précision au 1/10 000^e de millimètre. Chez le paon, une substance incolore maintient l'écartement des microlamelles ; chez les colibris, ce sont de minces cloisons transversales.

Le monde des couleurs d'oiseaux reste largement inexploré. Il révèle des surprises. Par exemple, les tangaras sont de petits oiseaux tropicaux aux couleurs éclatantes. L'un d'eux, le guit-guid saïd (*Cyanerpes cyaneus*) est d'un bleu intense qui, comme chez la perle ondulée, est produit par les barbes des plumes. Cependant celles-ci ont une structure originale : on n'y

observe pas de système de tubules, mais une structure en nid d'abeille, entourant des cavités, le centre de la barbuie étant occupé par de la mélanine noire.

Les rapports entre l'épaisseur des parois et la distance les séparant sont semblables à ceux que l'on observe chez les colibris : on peut penser que cette structure est comparable à un système de microlamelles concentriques, réunies par des traverses, renvoyant du bleu.

Maurice POMARÈDE est agrégé de l'Université, professeur honoraire en classe de biologie-mathématiques spéciales et responsable de la Commission recherche ornithologique de la Confédération ornithologique mondiale.



Pourquoi le Soleil brille-t-il?

ROLAND LEHOUCQ

Le Soleil brille parce qu'il est chaud, résultat d'un équilibre entre deux forces : la gravitation et la pression.

Pour les Grecs de l'Antiquité, Hélios le dieu Soleil parcourait le ciel dans son char brûlant, prodiguant lumière et énergie aux mortels. Au XIX^e siècle, les physiciens pensaient que le Soleil était une sphère de matière chaude qui se refroidissait. Ils en déduisaient que le Soleil n'avait pas plus que quelques dizaines de millions d'années, en contradiction flagrante avec les données géologiques de l'époque. Cette « crise de l'âge » n'a été résolue qu'au début du siècle, à l'aide des outils de la physique nucléaire.

En examinant le Soleil à l'aide de la thermodynamique et de la physique nucléaire, nous dressons un portrait de plus en plus précis du Soleil et plus généralement des étoiles. Nous verrons que la masse des étoiles ne peut être trop grande, ni trop petite et que les réactions de fusion les empêchent de s'effondrer sur elles-mêmes.

ENTRE L'ENVOL ET LA CHUTE

Le Soleil est une étoile, c'est-à-dire une importante masse de gaz chaud dont la cohésion est assurée par la gravitation : cette force tend à rapprocher toutes les particules. Sculptées par leur propre gravité, les étoiles sont sphériques, avec un léger renflement équatorial lors qu'elles sont en rotation.

Pourquoi une étoile ne se contracte-t-elle pas en un point ? Parce que la pression du gaz s'oppose à la gravité. À cette pression « classique » s'ajoute la pression de rayonnement due aux rebonds des photons

sur les particules matérielles (c'est cette pression qui repousse les grains de poussières des comètes pour former une queue courbée). Si toute pression venait à disparaître, le Soleil s'effondrerait sur lui-même en quelques minutes ! Un équilibre s'installe à condition que la pression augmente en s'enfonçant vers le centre du Soleil, car les couches les plus profondes doivent supporter le poids de toute la matière qui les coiffe (voir la figure 1). De la même façon, la gravité terrestre fait que la pression de notre atmosphère augmente à mesure que l'on s'approche du sol.

On détermine aussi que la densité et la température croissent avec la profondeur : au centre du Soleil, la température est de 15 millions de degrés et la densité de 200 grammes par centimètre cube (la densité du plomb est de 11 grammes par centimètre cube). Plus une étoile est massive, plus sa masse est supportée par une pression intérieure élevée et plus son centre est chaud.

Toutefois, la pression du rayonnement, proportionnelle à la puissance quatrième de la température, croît bien plus vite que la pression du gaz, proportionnelle à la température. Par conséquent, les étoiles très massives, la température centrale serait trop élevée et la pression du rayonnement si grande que l'étoile serait soufflée par sa propre lumière : la limite supérieure de la masse d'une étoile est d'environ 100 fois la masse du Soleil.

LE RAYONNEMENT ET L'ÉQUILIBRE

Le fort contraste de température entre le centre du Soleil et sa surface, où il ne règne « que » 5 700 degrés, détermine son évolution. Ici comme ailleurs, la chaleur s'écoule des régions chaudes vers les régions froides, du cœur vers la surface. Arrivée en surface, cette énergie s'échappe sous forme de lumière. Le rayonnement résulte donc de l'action de la gravité qui comprime et chauffe en permanence les régions centrales. Ainsi, le Soleil brille parce qu'il est suffisamment massif pour que la gravité impose sa loi.

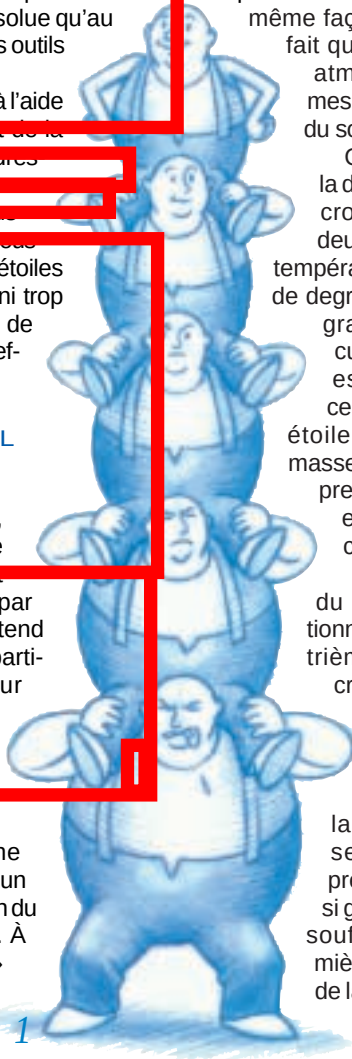
Cependant, cette égalisation des températures est tenue en échec par le jeu de la gravité. L'énergie d'une étoile diminue sous l'effet de l'émission de rayonnement et il faut que le moteur gravitaire agisse pour maintenir sa température : l'étoile se contracte, ce qui augmente la pression et la température des régions centrales.

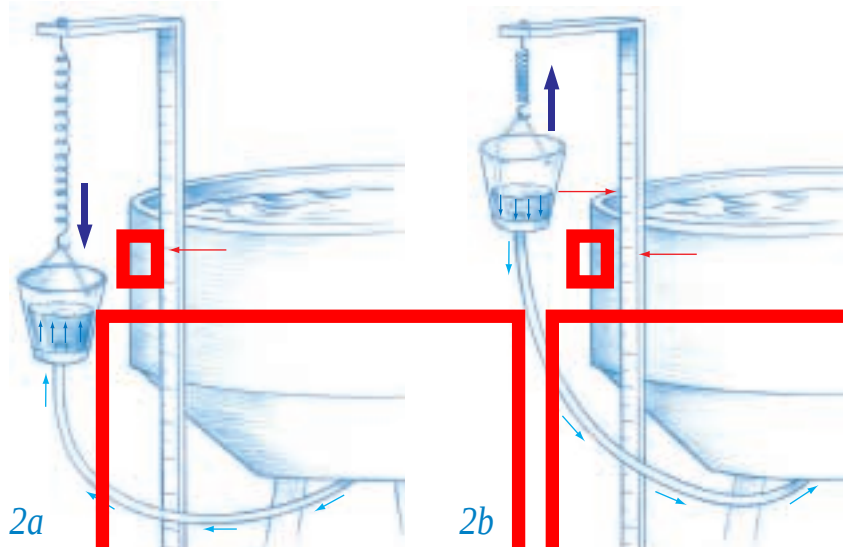
L'étoile se réchauffe en perdant de l'énergie ! La capacité calorifique, c'est-à-dire la quantité d'énergie à lui fournir pour augmenter sa température absolue d'un degré, est négative.

UNE ANALOGIE STELLAIRE : LE REMPLISSAGE DU SEAU

Une analogie mécanique nous aidera à comprendre ce comportement particulier. Nommons capacité volumique d'un seau le volume d'eau à y introduire pour augmenter son niveau d'un centimètre. Pour un seau normal, la capacité volumique est égale à la surface de sa section. Habituellement, les capacités calorifique et mécanique sont positives : il faut apporter de l'énergie au gaz, ou remplir le seau, pour que la température, ou le niveau, augmente. Qu'en est-il d'un seau suspendu à un ressort ?

Le remplissage du seau augmente sa masse ce qui allonge le ressort et le fait descendre. En choisissant un ressort





suffisamment mou, la descente du seau est supérieure à la montée de l'eau dans le seau. Si un grand réservoir alimente un seau suspendu dont le niveau absolu initial est plus bas que celui du réservoir, l'eau s'écoulera du réservoir vers le seau en raison du principe des vases communicants. L'alourdissement continu du seau abaissera continuellement le niveau absolu de l'eau qu'il contient, bien qu'il se remplisse de plus en plus (voir la figure 2a). De même, lorsque son niveau absolu initial est supérieur à celui du réservoir, le seau se vide dans le réservoir et son niveau absolu ne cesse d'augmenter (voir la figure 2b).

Ainsi, notre seau suspendu à un ressort est de capacité volumique négative : le niveau absolu de l'eau diminue lorsque l'on ajoute de l'eau et il augmente lorsque l'eau s'en écoule. De surcroît, le système est instable, car cette tendance n'est jamais contrée.

Comment stabiliser de tels systèmes ? En remplaçant le grand réservoir par un réservoir de plus petite section. Lorsque le niveau initial du seau est inférieur à celui du réservoir, l'eau s'écoule du réservoir vers le seau et le niveau absolu dans le seau diminue. Toutefois, en raison de sa faible section, le niveau dans le réservoir diminue plus vite que dans le seau, et un équilibre est atteint (voir la figure 3a). De la même façon, un équilibre est atteint lorsque le niveau initial du seau est supérieur à celui du réservoir (voir la figure 3b).

Le réservoir de faible section a une capacité volumique positive, inférieure en valeur absolue à la capacité volumique du seau.

NOUVEL APPORT D'ÉNERGIE

À mesure que le Soleil se contracte, la température des régions centrales augmente. À l'instar de notre seau suspendu à un ressort et relié à un grand réservoir,

la contraction et l'augmentation de température se poursuivraient indéfiniment s'il n'existait un mécanisme de stabilisation au-delà d'une température et d'une densité critique, les réactions de fusion de l'hydrogène en hélium démarrent. Le cœur du Soleil, où les réactions nucléaires produisent de l'énergie, est le réservoir de faible section de notre analogie, le système de capacité calorifique positive.

L'énergie engendrée par ces réactions stoppe la croissance de l'énergie totale en compensant l'énergie rayonnée. La contraction s'arrête et la température est stabilisée. En cas d'emballement des réactions nucléaires, le Soleil se dilate, donc se refroidit ce qui modère le taux de production d'énergie nucléaire. Inversement, si la production d'énergie nucléaire se fait par manque de combustible, la contraction induite réchauffe le cœur et démarre un nouveau cycle de fusion brûlant les cendres du précédent. L'étoile est en équilibre stable. Lorsque le combustible nucléaire est épuisé, l'étoile redevient instable et son destin ultime dépend de sa masse et des phénomènes quantiques entretenant alors en jeu.

Une étoile est un astre autogravitant dont la masse est suffisante pour déclencher des réactions de fusion nucléaire. La limite inférieure de la masse d'une étoile est d'environ 0,2 fois la masse du Soleil. Pour des masses inférieures, la contraction n'est pas suffisante pour que les réactions nucléaires se déclenchent, car la pression quantique, due au fait que les électrons ne peuvent tous être dans le même état quantique, bloque la contraction et l'élévation de température.

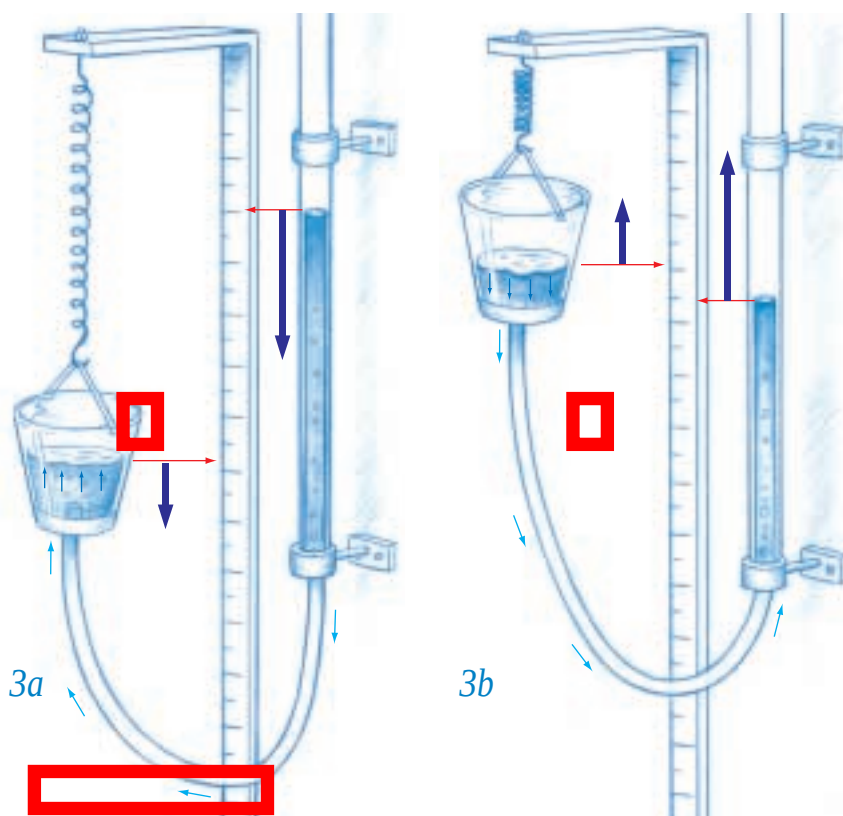
À l'issue de ce voyage dans le fonctionnement du Soleil, on aboutit à la définition canonique d'une étoile : un réacteur nucléaire continu et régulé par sa propre gravitation dont la masse est comprise entre 0,2 et 100 fois la masse du Soleil. Sans l'apport d'énergie des réactions nucléaires, une vingtaine de millions d'années ; finalement, le plus surprenant n'est pas que le Soleil brille, mais bien qu'il ait brillé pendant plus de 4,5 milliard d'années.

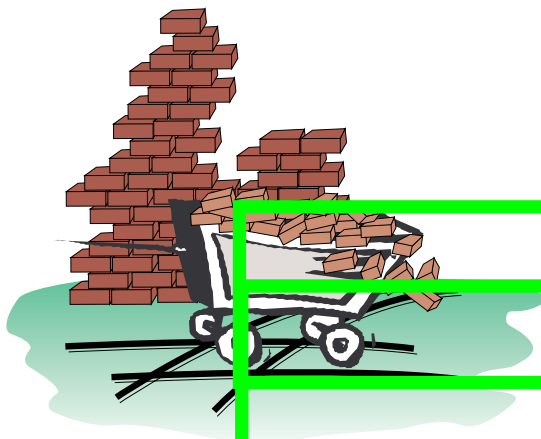
Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

J. AUDOUZE et **J.-P. CHIÈZE**, *Enquête sur l'Univers*, Nathan, 1990.

L. M. CELNIKIER, *Basics of Cosmic Structures*, Éditions Frontières, 1989.

M. NAUENBERG et **V. WEISSKOPF**, *Why Does the Sun Shine ?*, in *American Journal of Physics*, vol. 46, pp. 23, 1978.





Grilles toriques et fabrication de briques

IAN STEWART

Où comment éviter les déraillements de wagonnets devient un problème ardu de mathématicien.

Les mathématiques fascinent, notamment parce qu'elles sont pleines de surprises. Ainsi, des problèmes d'énoncés simples résistent parfois pendant des siècles aux plus brillantes intelligences. Le dernier théorème de Fermat (voir l'éditorial en mai 1996), démontré par Yves Hellegouarch, *Pour la Science* (février 1996), le problème de Kepler (voir *La conjecture de Kepler démontrée* par Christoph Pöppe, *Pour la Science* mai 1999) ou le théorème des quatre couleurs sont de beaux exemples de problèmes qui ont été résolus ces dernières années, alors que leurs énoncés dataient de plus d'un siècle.

Le problème des quatre couleurs a intéressé de nombreux mathématiciens, notamment les amateurs de jeux mathématiques, mais sa démonstration en a frustré plus d'un, car, avec elle, une source inépuisable d'amusements disparaissait. Reste-t-il aujourd'hui des problèmes amusants à la portée des amateurs? Une foule!

Le problème des quatre couleurs, apparu il y a 150 ans, était de savoir

combien de couleurs suffisent pour colorier les pays de n'importe quelle carte dessinée sur un plan de sorte que deux pays adjacents n'ont jamais la même couleur. Utilisant l'informatique, Kenneth Appel et Wolfgang Haken, de l'Université de l'Illinois, ont démontré en 1976 que ce nombre est quatre.

Le théorème des quatre couleurs appartient à la branche mathématique de la théorie des graphes. Un graphe est un ensemble de sommets (représentés par des points) joints par des arêtes. On représente une carte bidimensionnelle par un graphe en attribuant un sommet à chaque pays et en reliant deux sommets quand les pays correspondants sont adjacents. Ainsi, le problème des quatre couleurs devient un problème de coloriage des sommets du graphe associé à la carte.

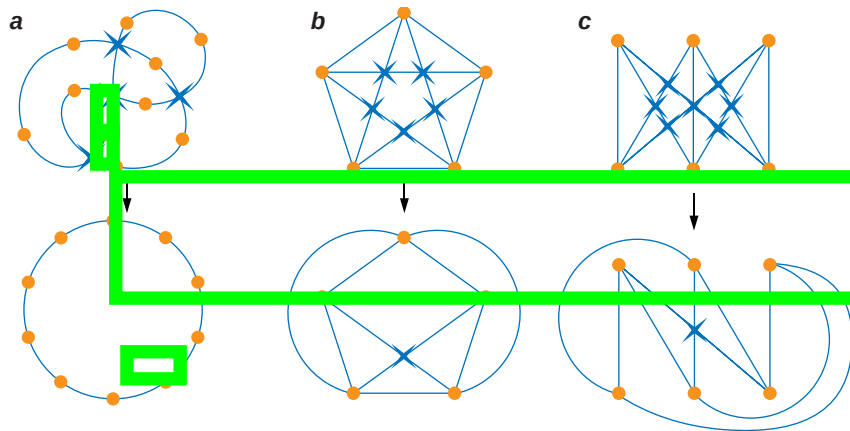
La théorie des graphes est une source de nombreux problèmes aussi faciles à énoncer que difficiles à résoudre. Tels sont les problèmes de croisements des arêtes d'un graphe, c'est-à-dire la recherche du nombre

minimal de croisements d'arêtes quand les sommets sont fixés (les arêtes ne se croisent que deux à deux; les intersections de trois arêtes sont interdites). En 1971, les mathématiciens Paul Erdős et Richard Guy ont signalé que la plupart des problèmes de croisements étaient non résolus; la situation n'a pas changé. On démontre très difficilement les conjectures, dans ce domaine, mais les amateurs de jeux mathématiques peuvent s'amuser beaucoup en considérant des graphes particuliers et en cherchant le nombre minimal de croisements d'arêtes. Ces tentatives infirmeront-elles certaines conjectures?

Les graphes sans croisements sont complètement décrits par le théorème démontré en 1930 par le mathématicien polonais Kazimierz Kuratowski. De tels graphes, qui ont un sommet, sont planaires. Le premier graphe de la figure 1 est composé de dix sommets, qui relient dix arêtes. Les quatre croisements présents (croisements bleus) disparaissent quand on déplace les sommets: on obtient un cycle à dix sommets, que l'on note C_{10} . Les graphes similaires à n sommets sont notés C_n .

Le deuxième graphe de la figure est dit complet, car chacun de ses cinq sommets est relié aux quatre autres. Il est noté K_5 , et les graphes analogues à n sommets sont notés K_n . Quel que soit le réarrangement de ses lignes, le nombre minimal de croisements d'un graphe K_5 est 1: le graphe K_5 n'est pas planaire.

Le troisième exemple est un graphe bipartite complet, c'est-à-dire que les sommets se répartissent en deux ensembles et que chacun des sommets d'un ensemble est relié à tous les sommets de l'autre ensemble. Ici, chaque ensemble contient trois sommets. Le graphe est noté $K_{3,3}$ et son nombre minimal de croisement est également 1. Il est équivalent au vieux problème où l'on veut relier trois maisons à des sources d'ap-



1. La recherche du nombre minimal de croisements pour les graphes est un problème d'énoncé simple, mais de démonstration très difficile. Un graphe planaire (a) peut être réarrangé de sorte que tous les croisements d'arêtes disparaissent. Le nombre minimal de croisements pour un graphe complet à cinq sommets (b) et pour un graphe à bipartition complète avec deux ensembles de trois sommets (c) est égal à 1.

Bryan Christie

provisionnement en eau, en gaz et en électricité sans que les tubulures ne se croisent. Le problème est impossible. Lorsque les deux ensembles ont m et n sommets, le graphe est noté $K_{m;n}$.

L'idée du nombre minimal de croisements est apparue en 1944, lorsque le mathématicien hongrois Paul Turán travaillait dans une fabrique de briques, près de Budapest. L'usine contenait des fours, qui cuisaient les briques, et des dépôts où les briques étaient entreposées. Les ouvriers transportaient les briques dans des wagonnets qu'ils poussaient sur un réseau de voies ferrées qui reliaient chaque four à chaque dépôt. Cependant, aux croisements, les wagonnets risquaient de dérailler, ce qui brisait les briques.

Alors qu'un ingénieur aurait amélioré les aiguillages, Turán chercha à minimiser leur nombre. Il élimina rapidement les croisements superflus, mais le problème général continua de l'intriguer. Avec m fours reliés chacun à n dépôts, le problème est le suivant : pour tout graphe biparti complet $K_{m;n}$, quel est le nombre minimal de croisements ?

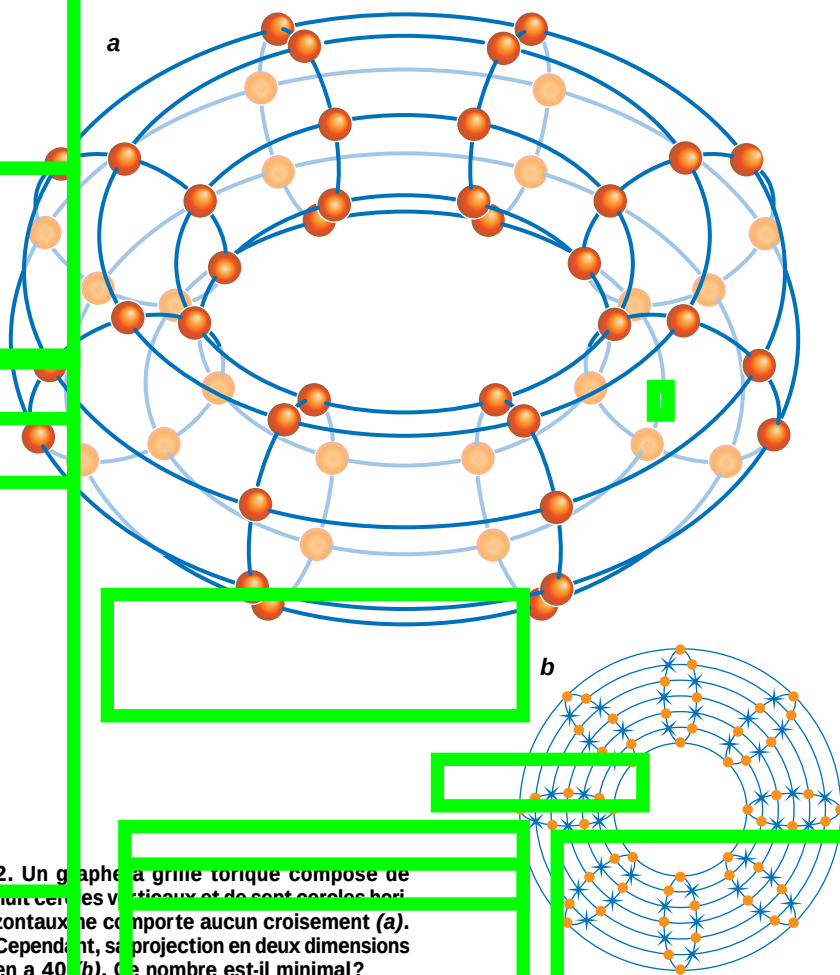
Le problème reste ouvert. Nadine Myers, de l'Université Hamline, a récemment montré que le nombre minimal de croisements n'est connu que pour les graphes complets K_n avec $n < 11$, et pour les graphes bipartis complets $K_{m;n}$ avec $2 < m < 7$.

La grille torique à maille rectangulaire représentée sur la figure 2 est un autre type de graphe, qui pose également des problèmes intéressants. Il est composé de deux familles de cercles : huit cercles verticaux passant par sept sommets (notés C_7) et sept cercles horizontaux passant par huit sommets (notés C_8). L'association de ces cercles forme un tore – une surface en forme de chambre à air – où les arêtes ne se croisent qu'aux sommets. Lorsque ce graphe ($C_7 \times C_8$) est écrasé sur un plan, chaque cercle vertical, devenu une ellipse, croise les cercles horizontaux en cinq points. Les arêtes du graphe se croisent donc, au total, 40 fois.

Généralisons avec m cercles horizontaux et n cercles verticaux (par convention, $m \leq n$). Les projections sur un plan de chaque cercle vertical coupent une fois, en un sommet du graphe, les m cercles horizontaux extrêmes et deux fois chacun des $(m-2)$ autres cercles horizontaux, dont une fois en un sommet. Ainsi chaque cercle vertical contribue pour $(m-2)$ croisements, et le graphe complet a $n(m-2)$ croisements. Ce nombre $n(m-2)$ est-il le nombre minimal de croisements

pour un graphe en grille torique ? Cette «conjecture (m,n) » n'a jamais été prouvée. Elle est vérifiée pour $2 < m < 7$ et pour $m = n = 7$. Pour le graphe $C_7 \times C_8$, on suppose que le nombre minimal de croisements est égal à 40, mais cette conjecture n'a jamais été démontrée. Si vous parvenez à redessiner l'illustration avec seulement 39 croisements, vous infirmerez cette conjecture.

En 1991, à l'Université Carleton, Gelaïe Salazar a démontré que le nombre de croisements d'un graphe ($C_m \times C_n$) est inférieur à $n(m-2)$, il ne l'est que de peu. Toutefois, un nombre minimal de croisements peu inférieur à 40 reste possible. La conjecture (m,n) est-elle fausse, ce qui expliquerait qu'on ne puisse la démontrer ? Ou bien est-elle aussi ardue que ses nobles consœurs, les conjectures de Fermat, de Kepler et des quatre couleurs ?



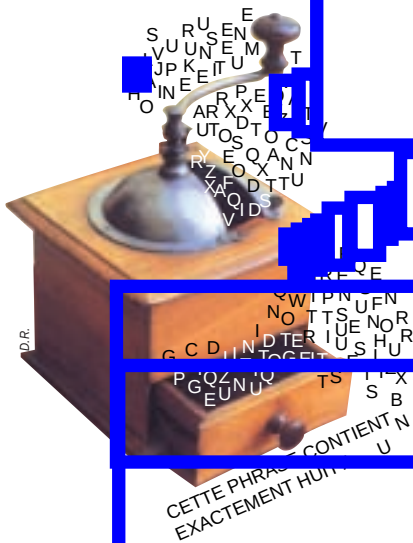
2. Un graphe à grille torique composé de huit cercles verticaux et de sept cercles horizontaux ne comporte aucun croisement (a). Cependant, sa projection en deux dimensions en a 40 (b). Ce nombre est-il minimal ?

Bryan Christie

Réactions

Dans la «conjecture du soufflet» (voir *Pour la Science*, août 1998), j'expliquais pourquoi il est impossible de construire un soufflet polyédrique, c'est-à-dire un polyèdre flexible qui change de volume en se déformant. Un point important concernait la parfaite impossibilité d'une face à se déformer et de deux faces en contact à se séparer. Cependant, le carton n'est pas absolument rigide. Un soufflet polyédrique à volume variable en carton est donc possible, car ses faces se déforment et ses arêtes se fendent.

David Briggs, à Waltrop (Allemagne), a breveté un ingénieux système de soufflet, utilisable par exemple en milieu hospitalier pour des poches à médicaments. Son site Internet : http://www.patents.ibm.com/details?pn=US03993222__&language=en. Selon l'inventeur, l'idée vient de son père qui lui a appris à faire rentrer dans le tube le dentifrice qui est sorti en trop : il suffit de presser le tube perpendiculairement à la première pression.



Cette phrase contient exactement...

huit a, un b, six c, cinq d, vingt-trois e, deux f, trois g, quatre h, dix-sept i, un j, un k, deux l, trois m, seize n, huit o, cinq p, sept q, dix r, onze s, vingt-quatre t, quatorze u, trois v, un w, sept x, un y et, finalement, quatre z.

JACQUES PITRAT

La phrase qui sert de titre et de chapeau à cet article décrit son propre contenu. Il y a bien huit a, un b, etc., et toutes les lettres de l'alphabet sont dénombrées. On trouve assez facilement de telles phrases, nommées phrases réflexives, quand elles ne décrivent qu'une partie de leur contenu, comme : « Cette phrase contient exactement cinq n et trois o. » L'utilisation d'un ordinateur facilite la découverte de phrases qui décrivent combien de fois elles contiennent chacune des 26 lettres de l'alphabet. Cette recherche a un parfum de rhétorique et devrait plaire au cercle de l'Oulipo.

Lorsque nous cherchons une phrase de ce type, le moindre changement a

de fâcheuses répercussions, car il modifie ce qui était correct auparavant. Si, par exemple, une phrase énonce qu'elle contient sept p alors qu'elle en contient en réalité six, et que nous changeons le sept en huit, nous modifions ce faisant le nombre de s, de e, de p, de h, de a et de n. Seul le nombre de t ne change pas, car il y en a un dans huit et un dans sept. En outre, nous n'avons toujours pas le bon nombre de p : la phrase énonce maintenant qu'elle contient huit p alors qu'elle n'en contient plus que sept !

Même la vérification de l'exactitude d'une solution est longue, et l'on s'y trompe souvent. Ainsi, la phrase suivante

est à la fois correcte et fautive : il est facile de voir que cette phrase contient six a, un b, sept c, dix-huit d, quatre e, cinq f, dix-sept g, dix-huit h, dix-sept i, dix-sept j, dix-sept k, dix-sept l, dix-sept m, dix-sept n, dix-sept o, dix-sept p, dix-sept q, dix-sept r, dix-sept s, dix-sept t, dix-sept u, dix-sept v, dix-sept w, dix-sept x, dix-sept y, dix-sept z. » Elle indique des nombres de lettres exacts, mais il n'est pas si facile d'en faire la vérification.

LE CORPS ET LES PARTIES, FIXES ET MOBILES

Pour faciliter la découverte des phrases réflexives à la main ou par l'informatique, nous allons séparer les lettres en plusieurs groupes, certains variant au cours de la recherche et d'autres non. On appelle « corps » d'une phrase réflexive l'ensemble de ses lettres qui ne sont pas dans les nombres associés aux lettres de l'alphabet. On le choisit au départ. Le corps de la phrase du titre et du chapeau est : *cette phrase contient exactement abcdefghijklmnopqrstuvwxyzet finalementz.*

La partie « fixe » de la phrase contient le corps auquel on ajoute les lettres des nombres associés aux lettres qui n'apparaissent dans aucun nombre : en français, b, j, k, w et y, auxquelles nous pouvons ajouter l et m qui n'apparaissent que dans mille, million et milliard, que l'on a peu de chances de rencontrer comme nombre de lettres dans une phrase normale. Les nombres associés à ces lettres ne varient pas quand on change un nombre associé à une lettre : la partie fixe de la phrase est entièrement déterminée par le choix du corps. Pour la phrase du titre et du chapeau, la partie fixe est : *cette phrase contient exactement a un b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y et finalementz.*



La partie «mobile» de la phrase est formée de lettres des nombres associés aux lettres pouvant figurer dans des nombres. Le corps d'une phrase étant choisi, c'est cette partie mobile que nous recherchons pour écrire une phrase réflexive. Pour la phrase du titre et du chapeau, la partie mobile est : *huitsix-cinqvingt-troisdeux-trois-quatre-dix-sept-seize-huit-on-sept-dix-onze-vingt-quatre-quatorze-trois-sept-quatre*.

Le problème a quelques variantes. Ainsi, en français, on peut considérer les caractères e, é, ê et ë comme une seule lettre ou comme cinq lettres différentes. Le choix d'un classement ou d'un autre n'est toutefois pas très important : en français, aucun nombre ne contient de lettre accentuée, à l'exception de zéro, qui ne peut apparaître (si l'on indique que l'on a zéro fois une certaine lettre, cette lettre apparaît une fois, et le zéro disparaît!). Ainsi, la distinction des lettres accentuées alourdit seulement la partie fixe de la phrase avec des nombres qui ne changeront jamais.

La phrase peut aussi mentionner le nombre d'espaces, de signes de ponctuation, de traits d'union, voire le nombre total de ses lettres. Avec les signes de ponctuation, on augmente seulement la partie fixe de la phrase : leur quantité n'est pas modifiée quand on change les nombres. En revanche, compter les traits d'union ajoute des lettres à la partie mobile, car tous les nombres n'ont pas de trait d'union. De même si l'on compte les espaces : trente et un a deux espaces alors que les autres nombres n'en ont aucun. Enfin, le nombre total de lettres change évidemment quand on modifie un nombre : pour les nombres inférieurs à 10, il va de 2 (un) à 19 (quatre-vingt-quatre). Dans chacune de ces trois variantes, on augmente d'une unité la quantité de nombres à trouver pour définir une phrase, ce qui complique un peu le problème.

On peut aussi rechercher les phrases réflexives le plus concises possibles, plutôt que d'indiquer qu'il y a, par exemple, «un k» ou «un w», on ne fait pas figurer ces lettres qui n'apparaissent qu'à l'endroit de la phrase où l'on en mentionne le nombre. Il est difficile d'être plus concis que la phrase suivante : «Trois a, deux c, six d, dix e, deux h, huit i, deux n, trois o, quatre p, quatre q, cinq r, sept s, dix t, sept u et sept x.»

Enfin, écrivain et logicien Georges Perec, voici une phrase réflexive qui ne contient pas de e. Elle est un peu alambiquée, car elle ne peut contenir que les nombres un, trois, cinq, six, huit, dix, dix-huit, vingt, vingt-trois, vingt-cinq, vingt-six et vingt-huit. Le nombre sans e suivant est un million ! «Ha, l'on trouva la solution ; il

Les éléments d'une phrase réflexive

On choisit d'abord le **corps** de la phrase, c'est à dire les lettres qui ne sont pas dans les nombres associés aux lettres :

cetitre contient abcdefghijklmnopqrstuvwxyz

Puis on détermine la **partie fixe** de la phrase, le corps plus les lettres des nombres associés aux lettres qui n'apparaissent dans aucun nombre (v, j, k, l, m, w et y) :

cetitre contient aubcdeignlmnjkahilnopqrstuvwxnyet z

Il ne reste qu'à déterminer la **partie mobile** de la phrase, les nombres associés aux lettres qui apparaissent dans les nombres :

Ce titre contient quatre a, un b, cinq c, cinq d, dix-neuf e, deux f, un g, deux h, treize i, un j, un k, un l, un m, seize n, trois o, quatre p, sept q, sept r, sept s, quinze t, dix-huit u, un v, un w, six x, un y et quatre z.

rit, titra tout, sans tri, sur un trait gras : cinq c, huit a, trois g, six d, vingt-cinq i, six h, dix k, cinq l, cinq q, huit o, dix s, dix r, dix u, dix-huit t, huit x, trois v».

DES CHIFFRES ET DES LETTRES

Comment écrire de telles phrases ? Pour un corps donné, on pourrait écrire toutes les phrases possibles en utilisant systématiquement tous les ensembles possibles de 26 nombres ; on vérifierait ensuite seulement si chacune de ces phrases décrit correctement son contenu. Cette méthode est toutefois inutilisable : le nombre de situations possibles est infini, et même en restreignant le choix aux nombres inférieurs à 30, par exemple, le plus puissant des ordinateurs n'en viendrait pas à bout en un temps raisonnable.

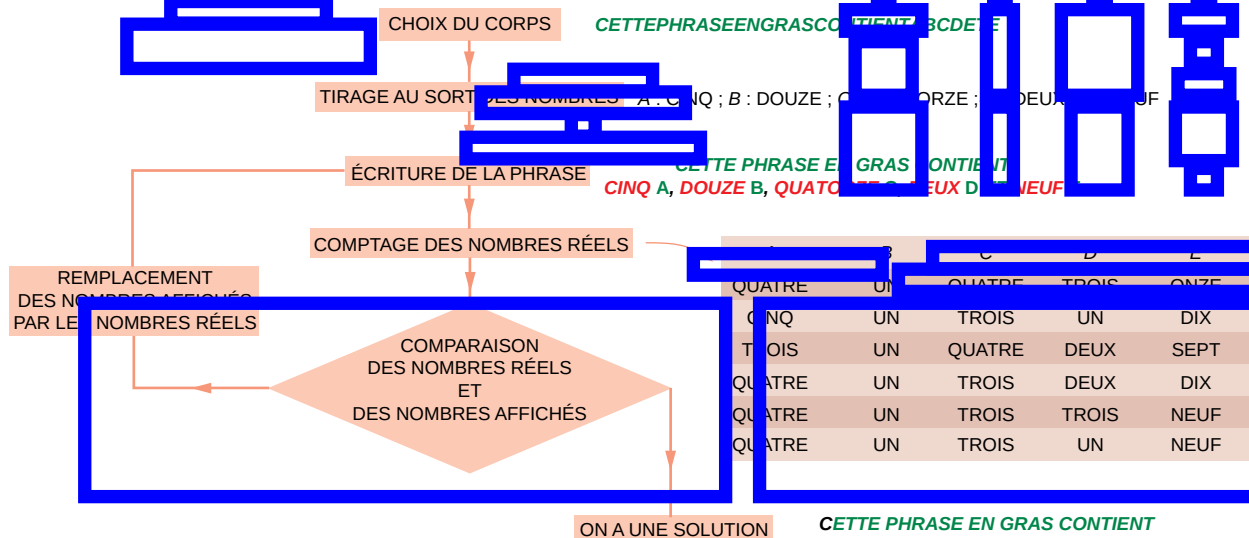
En français, on peut réduire le nombre de combinaisons : nous avons vu que seulement 19 lettres peuvent figurer dans un nombre. En outre, les lettres g et v apparaissent toujours ensemble, et seulement dans le nombre vingt, le nombre de g et de v qui apparaissent dans des nombres sont toujours les mêmes. Les nombres associés au g et au v figurent toutefois dans la partie mobile : ils peuvent tous les deux changer, bien que ces changements soient liés. Ainsi, un corps étant donné, nous n'avons que 18 nombres à déterminer. C'est encore trop.

Heureusement, Douglas Hofstadter, dans *Sur l'ivresse du langage*, a décrit une méthode plus efficace pour créer des phrases réflexives. Pour chaque lettre de l'alphabet, on nomme «nombre réel» le nombre d'apparitions de cette lettre dans la phrase et «nombre affiché» celui qui, dans la phrase, est associé à cette lettre. Ainsi, dans «cette phrase contient quatre a», le nombre affiché pour a est quatre et le nombre réel est trois.

Le corps de la phrase étant choisi, on commence alors en tirant au sort les 26 nombres affichés que l'on cherche. Si, pour toutes les lettres, le nombre affiché est égal au nombre réel, on tient une solution. Sinon, ce n'est pas le cas, on remplace par un autre nombre le nombre affiché par son nombre réel, qui devient ainsi le nouveau nombre affiché. On poursuit le processus en vérifiant à chaque itération si les nombres affichés sont ou non égaux aux nombres réels.

Deux cas peuvent se produire : soit on arrive à une solution, soit on retrouve une situation déjà rencontrée et l'on tombe dans une boucle. On pourrait détecter les boucles en gardant les situations déjà rencontrées, mais cela obligerait à conserver en mémoire beaucoup trop de situations et nécessiterait un grand nombre de comparaisons. Il est plus simple de limiter le nombre d'itérations permises : si l'on dépasse cette limite, on arrête, on refait un tirage pour les nombres affichés et l'on recommence les itérations. On fixe aussi une limite au nombre de tirages de départ. Si on la dépasse, on arrête les essais pour ce corps. Ces nombres maximum d'itérations et de points de départ ont une grande influence sur le succès de la méthode et sur le temps de calcul.

Pour un corps donné, il n'existe pas toujours une phrase réflexive, même dans le cas simple où l'on s'intéresse aux apparitions d'une seule lettre. Ainsi la phrase : «Cette courte phrase contient en tout six e» est incorrecte puisqu'elle contient sept e. Changeons alors le six en sept : «Cette courte phrase contient en tout sept e.» Cela ne va toujours pas puisqu'il y en a maintenant huit. Changeons le sept en huit : «Cette courte phrase contient en tout huit e.» Et nous revenons à sept e. Si l'on met neuf, on aura seulement huit e : il n'y a pas de solution.



Un algorithme permet de trouver des phrases réflexives dont on a initialement choisi le corps : on tire au sort les nombres associés aux lettres, on écrit la phrase, et on compare ces nombres affichés avec les nombres réels. Si des nombres réels sont différents des nombres affichés, il les remplace, et on recommence jusqu'à ce que l'on ait trouvé une solution. Dans l'exemple, volontairement limité aux cinq premières lettres de l'alphabet, on obtient une solution après six itérations seulement (les

valeurs des nombres réels à chaque itération sont donnés dans le tableau à droite). Avec tout l'alphabet, plusieurs milliers d'itérations sont généralement nécessaires, et l'on ne trouve pas nécessairement de solution, même s'il en existe une. Une amélioration de la méthode consiste à ne remplacer, à chaque étape, qu'un seul des nombres affichés par le nombre réel de la lettre correspondante : on bouleverse ainsi moins la phrase à chaque étape, et on trouve plus fréquemment une solution.

Par cette méthode, nous trouvons quelquefois des solutions. Son succès est surprenant, car la phrase est bouleversée à chaque itération : la valeur de la plupart des nombres appartenant à la partie mobile est modifiée à chaque étape. Chaque phrase est donc très différente de la précédente, et l'on ne s'approche pas régulièrement de la solution (si elle existe) : on peut successivement s'en approcher et s'en éloigner.

Toutefois, ce procédé a un avantage important : si l'on arrive à une situation où l'ensemble des lettres des nombres réels est identique à l'ensemble des lettres des nombres affichés, on obtient la solution à l'étape suivante. Si, par exemple, nous avons dans la phrase du titre et du chapeau « quatre t », au lieu de vingt-quatre, et « vingt-sept x » au lieu de sept, les autres nombres étant les mêmes. Les nombres réels donneront, à l'étape suivante, « vingt-quatre t » et « sept x », ce qui est la solution.

UN SEUL REMPLACEMENT

J'ai amélioré cette méthode. Au lieu de remplacer à chaque itération tous les nombres affichés par les nombres réels correspondants, le programme choisit une seule lettre dont le nombre affiché est différent du nombre réel, et il ne remplace que le nombre affiché de cette lettre par son nombre réel. Cette nouvelle méthode doit préserver une qualité essentielle de la précédente : quand l'ensemble des lettres des nombres réels est le même

que l'ensemble des lettres des nombres affichés, on doit obtenir la solution à l'étape suivante. Sinon, on risque de passer à côté d'une solution évidente. J'ai donc ajouté une vérification : le programme détermine l'ensemble des lettres des nombres réels et celui des lettres des nombres affichés qui en diffèrent. Si ces deux ensembles sont identiques, l'ensemble des nombres réels est une solution. Pour ne pas trop allonger le temps de calcul, le programme ne fait cette comparaison que si l'écart entre les nombres réels et les nombres affichés (l'écart est la somme des valeurs absolues des différences entre les nombres réels et les nombres affichés) n'est pas trop grand.

Cette amélioration est performante : elle permet de trouver plus de solutions. Cela est dû à ce que la phrase est moins bouleversée à chaque itération, puisque l'on ne change qu'un seul nombre affiché : la partie mobile est plus stable.

Pour trouver de nombreuses phrases, j'ai introduit dans le programme un générateur de corps de phrases. J'ai défini d'une part un « noyau », suite de mots commune à tous les corps, et j'ai défini d'autre part plusieurs « amorce », dans le noyau, où le programme peut insérer un « ajout », groupe de mots pris parmi plusieurs possibilités liées à chaque endroit. La présence ou l'absence de ces ajouts ne change pas le sens du corps : par exemple, « cher lecteur », « chers lecteurs », « ami lecteur » en tête de phrase ou « pour terminer », « finalement », « pour finir » avant le z final. En combinant une dizaine de

possibilités d'ajout, on crée de nombreux corps. À partir d'un même noyau, le programme engendrerait 12 288 corps différents, ce qui pouvait donner naissance à environ 5 000 phrases réflexives.

PLURALITÉ DE SOLUTIONS

Le même corps donne parfois plusieurs solutions. Pour le cas de deux caractères, nous avons vu la phrase : « Cette phrase contient exactement cinq n et trois o. » Il existe d'autres solutions sur le même corps, par exemple : « Cette phrase contient exactement quatre n et trois o », « Cette phrase contient exactement cinq n et deux o », « Cette phrase contient exactement quatre n et deux o. »

Ce phénomène est fréquent, même quand on indique les nombres d'apparitions des 26 lettres de l'alphabet : pour les corps ayant au moins une solution, le nombre moyen de solutions est d'environ 1,5. Le record actuel est de dix phrases différentes construites sur le même corps. Voici l'une de ces dix phrases : « Vous avez bien raison de compter toutes les lettres de cette phrase avant de la croire quand elle vous assure qu'elle contient quinze a, deux b, sept c, sept d, quarante-trois e, quatre f, cinq g, trois h, vingt et un i, un j, un k, huit l, quatre m, vingt-cinq n, treize o, sept p, douze q, vingt et un r, quinze s, trente-quatre t, vingt-quatre u, neuf v, un w, trois x, un y et pour terminer six z. »

À partir d'un point de départ, on peut soit arriver à une solution, soit tourner indéfiniment dans une boucle.

Cette dernière situation est la plus fréquente, d'une part parce qu'il y a des corps sans solution et d'autre part parce qu'il arrive souvent qu'un point de départ conduise à une boucle même quand il existe une solution. La phrase sans *e* n'a pas été trouvée une seule fois par le programme, bien qu'il ait essayé 200 000 points de départ.

Il arrive aussi que l'on ne trouve pas de solution parce que l'on n'a pas poussé assez loin les itérations : certaines solutions n'apparaissent qu'après plus de 10 000 itérations. Dans la plupart des cas, on les trouve toutefois avant 5 000 itérations, et souvent avant 2 000. Par ailleurs, une solution obtenue après beaucoup d'itérations pour un point de départ peut l'être avec bien moins d'itérations pour un autre point de départ. Il est donc préférable d'augmenter le nombre de points de départ et de diminuer le nombre d'itérations.

Avec des valeurs assez grandes pour les nombres de points de départ et d'itérations, le programme trouve au moins une solution pour plus de la moitié des corps. Le nombre total de solutions est encore plus élevé à cause des solutions multiples : il vaut environ trois quarts du nombre de corps essayés.

Ces méthodes réussissent parce que, l'expérience le montre, la probabilité est grande qu'il existe une solution pour un corps quelconque. Elles sont toutefois inefficaces pour trouver une phrase sans *e*, parce qu'il est très improbable qu'un corps conduise à une telle solution : on ne peut utiliser qu'à peine la moitié des nombres inférieurs à 30 (et aucun au-delà), et la probabilité que tous les 18 nombres cherchés soient dans cet ensemble est faible. Aussi ai-je construit sans l'aide de l'ordinateur la phrase sans *e* citée plus haut. J'ai d'abord choisi les nombres affichés pour chaque lettre. En enlevant les lettres de ces nombres de l'ensemble des lettres décrit par ces mêmes nombres, j'ai obtenu l'ensemble des lettres du corps : si je décide que la phrase contiendra cinq *q*, j'enlève une unité pour *e q* qui est dans cinq que je viens d'affecter à *q*; le corps de la phrase contiendra quatre *q* (dont la lettre isolée). J'enlève alors à ces quantités affectées aux lettres *c*, *i* et *n*. Ayant ainsi obtenu les lettres du corps, j'ai recherché un anagramme contenant une phrase correcte au point de vue de la syntaxe et du sens. Mon premier choix initial des nombres affichés a été guidé par les fréquences des lettres en français, afin de maximiser mes chances de résoudre ensuite l'anagramme.

«Au fond, est-ce bien utile de savoir que cette phrase contient cinq *a*, deux *b*, huit *c*, huit *d*, vingt *e*, quatre *f*, cinq *g*,

six *h*, vingt-deux *i*, un *j*, un *k*, deux *l*, un *m*, vingt-deux *n*, cinq *o*, dix-sept *p*, cinq *q*, huit *s*, dix-neuf *t*, vingt *u*, six *v*, un *w*, huit *x*, un *y* et enfin un *z*?» De nombreux problèmes du monde réel, à cause de liens très étroits entre différents domaines, ont les mêmes caractéristiques que la construction de phrases réflexives : chaque action a des répercussions importantes sur la situation et détruit ce qui était satisfaisant.

L'évolution des espèces, par exemple, est mue par un tel mécanisme, selon l'hypothèse de la Reine Rouge proposée par Leigh Van Valen : si l'une des espèces qui exploient un milieu évolue dans le sens d'une meilleure adaptation, accroissant ainsi son succès reproductif, elle diminue la qualité de l'adaptation des autres espèces. Ces dernières évoluent alors pour survivre, annulant ainsi l'avantage de la première. De même, la protection d'un carnivore devenu rare dans un milieu naturel a des répercussions sur la survie de ses proies, qui peuvent à leur tour se raréfier exagérément. Les hommes politiques veulent tous relancer l'économie et réduire le chômage : ils prennent une mesure qui paraît raisonnable pour le but cherché, mais qui a des conséquences imprévues et néfastes sur d'autres points ; cela les oblige à prendre une autre mesure pour y remédier, mais cette nouvelle mesure a des conséquences négatives pour le but initial. Il serait intéressant de trouver des méthodes efficaces pour résoudre de tels problèmes.

En outre, la méthode utilisée donne de bien meilleurs résultats que ce que nous attendions. Capte-t-elle une régularité encore inconnue du problème, voire du monde ? Y a-t-il d'autres problèmes pour lesquels une méthode analogue obtient des succès contre toute attente ? Le succès est-il dû à l'utilisation d'un mécanisme évolutif, ou l'on corrige systématiquement les erreurs décelées sans se préoccuper des conséquences souvent néfastes de ces corrections ? Nous sommes surpris, et il est toujours utile de réfléchir pour comprendre les raisons d'une surprise.

Jacques PITRAT est directeur de recherche CNRS au Laboratoire d'informatique de l'Université Paris 6.

Jacques PITRAT, *Ce titre contient quatre a, un b, cinq c...*, rapport de recherche n° 26 du LAFORIA (Paris 6). Ce rapport contient le listing du programme C qui a créé ces phrases réflexives. Il est téléchargeable à l'adresse <http://www.apa.lip6.fr/META/pitrat.html>

Douglas HOFSTADTER, *Ma Thémagie*, InterEditions, 1988.

Le vol du frisbee

LOUIS BLOOMFIELD

Les frisbees modernes ne ressemblent plus beaucoup aux plats à tarte de la Société *Frisbie Pie* et que s'amusaient à lancer les étudiants et les militaires américains il y a plusieurs décennies. Cependant, les mêmes phénomènes assurent la sustentation des deux objets : la poussée aérodynamique s'ajoute à l'effet gyroscopique.

EN VOL, le disque fend l'air : celui-ci est accéléré au-dessus du frisbee (selon la loi de Bernoulli, la pression d'un fluide est réduite quand sa vitesse augmente). De plus, l'air qui passe en dessous du disque est dévié ; par réaction, le disque est poussé vers le haut.

Un frisbee vole mal à l'envers, car les courants d'air suivent difficilement une surface concave. Des tourbillons qui se forment derrière le frisbee détruisent le phénomène de succion et augmentent la résistance à l'air : le frisbee tombe comme une pierre. Certains joueurs utilisent cet effet pour des lancers difficiles à rattraper.

BONNE ORIENTATION

FIBLES TURBULENCES

BASSE PRESSION

HAUTE PRESSION

MAUVAISE ORIENTATION

TOURBILLONS

HAUTE PRESSION

FRISBEE SANS ROTATION

FORCES AÉRODYNAMIQUES

DIRECTION DU VOL

FRISBEE EN ROTATION

POUSSÉE

AXE DE ROTATION

LA ROTATION joue un rôle crucial. Sans elle, même un frisbee bien orienté tombe comme une feuille morte, car les forces aérodynamiques ne sont pas parfaitement centrées : la succion est plus importante à l'avant du frisbee, qui peut se relever et se retourner. En revanche, un frisbee en rotation maintient longtemps son orientation grâce à l'effet gyroscopique, que l'on observe nettement quand on soulève l'avant d'un vélo et qu'on fait tourner la roue avant : on tourne alors difficilement le guidon, la rotation

s'opposant aux couples qui tendent à changer le plan de rotation de la roue.

La silhouette adaptée d'un frisbee place les forces ascensionnelles presque en son centre. Plus épais, les bords du disque augmentent le moment cinétique – donc la stabilité –, tandis que les rainures à la surface du frisbee produisent des turbulences microscopiques dans l'air. Ces turbulences maintiennent les courants d'air supérieurs collés à la surface du frisbee et lui permettent de s'envoler plus loin.

Science de la Terre

Les volcans

Claude Jaupart. Éditions Flammarion, 1998.

Au-delà d'un titre un peu galvaudé (une douzaine de livres homonymes sont aujourd'hui en vente), on découvre un ouvrage original et attendu. En 128 pages judicieusement illustrées, Claude Jaupart situe de manière synthétique les enjeux de la volcanologie moderne et fait le point des voies de recherche et des connaissances dans la discipline. Par un discours clair et accessible, sans jargon scientifique inutile qui en limiterait la portée, l'auteur brosse un tableau général du phénomène volcanique, des principes physiques qui le régissent, jusqu'à la manière dont on envisage la prévention de ce risque naturel, en passant par ses principaux produits et par les aspects sociologiques de la question.

Dans son ouvrage, Cl. Jaupart présente les concepts modernes en volcanologie dans toute leur diversité. La complexité des phénomènes naturels est prise en compte par un faisceau d'études couplées, allant de l'observation naturaliste, traditionnelle et indispensable, à l'utilisation de méthodes chimiques, physiques et mathématiques, qui font appel à de multiples développements techniques et méthodologiques. L'auteur nous entraîne ensuite dans une réflexion sur les relations entre les volcans et les hommes, qui nous conduit naturellement aux enjeux et aux techniques de la surveillance et de la prévision ; il conclut à la nécessité de prendre en compte le phénomène volcanique de manière globale, à travers tous les phénomènes élémentaires qui le déterminent.

La prévention du risque volcanique a pris de l'importance, car le monde contemporain développe deux caractéristiques : la concentration urbaine et l'intensification du transport aérien. On estime que 500 millions de personnes sont exposées au risque volcanique. Durant les cinq derniers siècles, plus de 200 000 personnes ont perdu la vie en raison d'éruptions et, depuis le début du siècle, la mortalité annuelle liée aux volcans a triplé par rapport aux siècles précédents. Cela n'est pas dû à un accroissement de l'activité vol-

canique, mais, en partie, au développement de l'information et des moyens de recensement des victimes et, surtout, à l'augmentation de la population et à sa concentration dans des zones à risque. Près de la moitié des habitants de la planète vivent dans des villes, et cette proportion s'accroîtra encore dans l'avenir. Cette évolution est surtout sensible dans les pays en développement, dont la faiblesse économique ne permet pas des investissements adéquats en infrastructures. Parallèlement, les zones urbaines dépendent de plus en plus de leur environnement, elles deviennent vulnérables. Au Chili, au Mexique, aux Philippines, beaucoup sont situées à portée d'éruption. Or la surconcentration urbaine fait apparaître des risques supplémentaires, au cas où une évacuation serait déclenchée d'urgence : le logement serait, également, bien plus problématique.

Le trafic aérien, qui s'accroît chaque jour, pâtit également des volcans : durant les 20 dernières années, plus d'une centaine d'avions, au cours d'une liaison aérienne ou au sol, ont fait les frais d'une rencontre avec un nuage de cendres volcaniques à la dérive. Une telle rencontre est dangereuse, parce que la température dans les réacteurs est suffisamment forte pour fondre les cendres et bloquer les moteurs de l'appareil. D'autre part, les cendres peuvent provoquer une perte de visibilité, contaminer le système de climatisation et bloquer l'appareillage électronique. Enfin, le pouvoir érosif des cendres, ainsi que celui de l'acide sulfurique provenant du dioxyde de soufre libéré par l'éruption, peut provoquer d'importants dégâts. Des milliers de passagers se sont ainsi retrouvés en danger, mais l'issue n'a jamais été tragique. En revanche, les réparations nécessaires ont coûté très cher, et le trafic a été gravement perturbé, essentiellement dans les zones au Nord et à l'Ouest du Pacifique. L'identification de ce risque a suscité la mise en œuvre d'une coopération originale entre les communautés météorologiques, volcanologiques et aéronautiques.



Les fronts de lave ne peuvent généralement être arrêtés.

Comment s'accommoder des caprices des volcans ? Il faut d'abord les comprendre. Dans l'imagerie populaire, la volcanologie est encore, souvent, associée à des figures d'aventuriers robustes et enthousiastes, prêts à gravir les pentes abruptes, le visage protégé par un mouchoir ; le géologue, lui, est souvent considéré comme un glaneur de petits cailloux. Pourtant cette image nous renvoie plusieurs décennies en arrière, et bloque une appréhension moderne de la volcanologie et de ses méthodes. Il est révélateur que cet ouvrage nous soit proposé par un géophysicien de renommée mondiale, qui s'est initialement fait connaître par ses travaux sur le flux de chaleur terrestre et qui est aujourd'hui capable de rivaliser sur le terrain avec nombre de géologues plus naturalistes.

Comme le souligne très bien Cl. Jaupart, la compréhension du phénomène volcanique ne peut se réduire à l'étude de quelques cailloux ou de quelques photographies de coulées de lave, aussi jolies soient-elles. Le phénomène doit faire l'objet d'une appréhension globale, dans le temps, dans l'espace. Un volcan n'est que la partie émergée d'un système enraciné à des centaines de kilomètres sous la surface du Globe, et son activité est la résultante d'une multitude de phénomènes, de la convection dans le manteau à la fracturation des roches de l'encaissant, en passant par la différenciation des magmas et l'individualisation de la phase gazeuse. La prévision des éruptions passe nécessairement par la compréhension de tous ces phénomènes.

À une époque où l'on est préoccupé des retombées économiques directes de la recherche scientifique et où certains s'émeuvent du faible nombre de brevets déposés par les chercheurs, l'exemple de la prévention du risque volcanique illustre le fait que certains travaux difficiles à valoriser par des brevets sont indispensables pour la compréhension de phénomènes économiquement importants.

Le livre de Cl. Jaupart comble une lacune. Alors que la littérature volcanologique francophone est essentiellement constituée d'albums photographiques, d'ouvrages classiques décrivant dans le détail la diversité des appareils volcaniques ou de leurs aspects, et de recueils spectaculaires, ce document présente une vision globale du phénomène. Il doit être lu par quiconque veut avoir une idée moderne des développements actuels de la volcanologie et de la manière dont se comprend aujourd'hui la prévention du risque volcanique.

Jean de BREMOND d'ARS

Astronomie

Il pleut des planètes

Alfred Vidal-Madjar. Éditions Hachette, 1999.

Looking for Earths

Alan Boss. Éditions Wiley and Sons, 1998.

Extrascalar Planets : the Search for new worlds

Stuart Clark. Éditions Wiley-Praxis, 1998.

communauté des astronomes ou dans les journaux.

Rappelons, pour situer le domaine et ses enjeux, qu'une bombe scientifique a éclaté en deux temps : en 1992, Alex Wolszczan et Dale Frail découvrent trois planètes autour d'un pulsar ; puis, en 1995, Michel Mayor et Didier Queloz détectent indirectement une planète autour d'une étoile analogue au Soleil (à l'aide d'un de ces petits télescopes que les institutions scientifiques vouent à la disparition). C'était la fin d'un suspense qui durait depuis l'antiquité grecque, et c'était un pas majeur dans la quête de formes de vie en dehors du Système solaire : la question « Sommes-nous seuls dans l'Univers » acquérait enfin droit de cité dans le monde de la science. Depuis, on a même trouvé un système planétaire avec trois planètes géantes, et les découvertes ne font que commencer. Les astronomes ont aujourd'hui une feuille de route claire pour le siècle qui vient : trouver des planètes telluriques, y déceler des traces d'activité biologique, faire la cartographie de ces planètes et, enfin, les observer *in situ*. De quoi les occuper pendant de longues décennies. Ajoutons toutefois un bémol : les chercheurs ne seront pleinement rassurés que lorsqu'ils auront directement « vu » une planète.

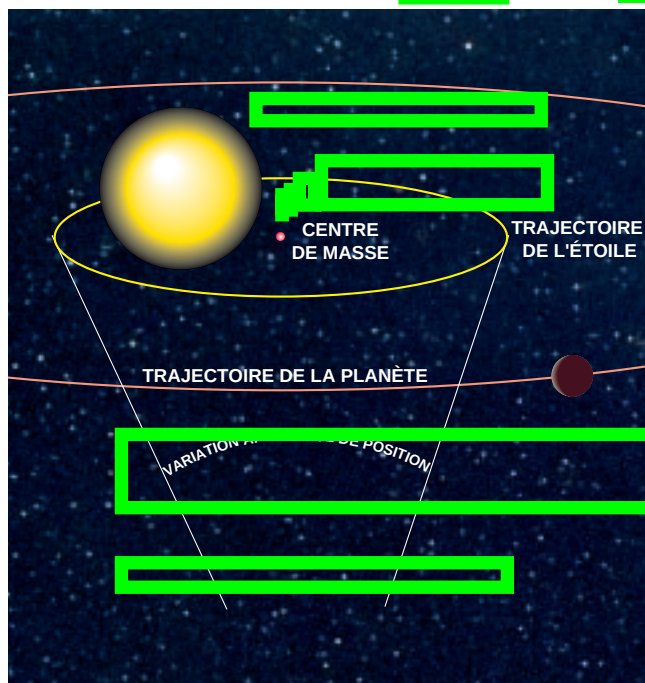
C'est de cette épopée récente et en cours (la période couverte par le livre va de 1963 à la fin 1997) que A. Boss dresse un tableau vivant sous la forme d'un journal de bord. L'auteur est un théoricien de la formation des systèmes planétaires, mais il a lu nombre de publications qui conseillent

la NASA dans ce domaine. C'est dire qu'il n'est pas un observateur, mais un quasi acteur de cette quête. Le principal intérêt de son ouvrage est de présenter un compte rendu fidèle de l'état d'esprit qui a prévalu dans les années 1990-1995. Les astronomes avaient alors découvert des planètes autour du pulsar PSR 1257+12 ; ils avaient observé un nombre croissant de disques de poussières autour des étoiles ; des modèles théoriques montraient que la formation d'un système planétaire devait être courante, etc. Ces signes avant-coureurs faisaient espérer la découverte proche de systèmes planétaires. Le CNRS avait également envisagé l'événement, s'engageant, dès l'été 1995, dans la création d'une organisation spécifique aux planètes extrasolaires.

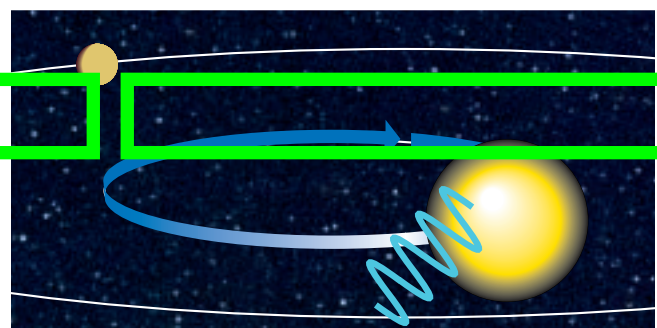
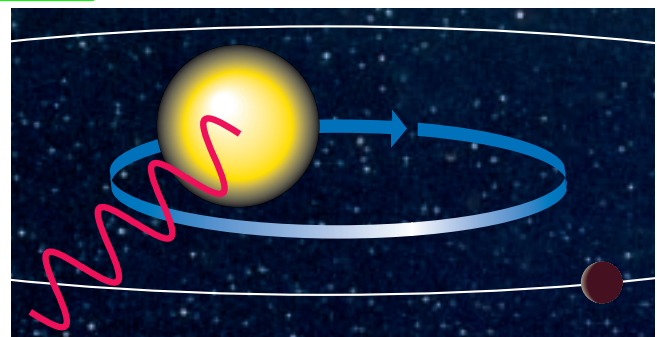
Laissons au lecteur le plaisir de découvrir les étapes de cette saga, décrite avec un certain sens du rebondissement, jusqu'à la chance extraordinaire de M. Mayor et D. Queloz (dont la découverte en 1995 était cinq fois plus forte et 1 000 fois plus fréquente que prévu : la nature a rarement favorisé autant des esprits préparés). A. Boss a d'ailleurs joué un rôle clé dans cette histoire, par un article remarqué, qui avait orienté les observateurs dans la mauvaise direction. A-t-il, plus ou moins consciemment, voulu expier sa « faute », en écrivant ce livre ?

En fait, il ne présente qu'une version : celle de la NASA. Une phrase d'un collègue, rapportée par l'auteur, et se situant à l'été 1995, trois mois avant la découverte de M. Mayor, est révélatrice : « La

« La découverte des planètes extrasolaires commence à se pointer sur l'écran radar de nos politiques », écrit Alan Boss, dans un livre sous-titré *The race to find new solar systems* (« la course aux nouveaux systèmes solaires »). Il évoque ainsi ce qui se passe à Washington, mais il n'est pas sûr que les hommes politiques français soient aussi sensibilisés que leurs homologues américains : leur horizon semble se limiter aujourd'hui à la planète Mars. L'étude de ce qu'Alfred Vidal-Madjar nomme judicieusement les « planètes du prochain millénaire », dans *Il pleut des planètes*, reste, dans les faits, un sujet marginal en Europe, même si ces planètes font déjà parler d'elles dans le



Deux méthodes de datation des planètes extrasolaires : par l'observation de l'étoile autour de laquelle gravite la planète (à gauche), ou par mesure du décalage en longueurs d'onde de la lumière émise



par l'étoile (à droite), en raison de l'effet Doppler (le même phénomène que celui qui décale le son d'une ambulance en mouvement).

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 30 juin 1999.

FRANCE

info

NASA doit "posséder" la première planète extrasolaire ; non seulement les Européens sont une menace à cet égard, mais la découverte par un programme américain non financé par la NASA serait un échec de l'agence.» Le récit se restreint ainsi au continent américain, occultant complètement les efforts européens analogues (quoique moins coordonnés), notamment depuis que l'astrophysicien français avait proposé, en 1975, de configurer le télescope spatial *Hubble* en vue de la recherche des planètes (ce projet fut anéanti par la «myopie» de ce télescope). Le livre est, par conséquent, entaché de nombreuses omissions ou distorsions historiques, de sorte qu'il ne faut le prendre que pour les impressions vivantes d'un témoin en première ligne.

Pour avoir une initiation solide, on consultera plutôt le livre de Stuart Clark, *Extrasolar Planets : the Search for New Worlds* (« Planètes extrasolaires : la recherche de nouveaux mondes »). Il contient un panorama complet et à jour des méthodes de détection des planètes extrasolaires, des découvertes et des projets dans ce domaine (accélérométrie, astrométrie, imagerie, transits, amplification gravitationnelle). On trouvera aussi une synthèse de la formation des systèmes planétaires. Enfin le livre n'oublie pas de décrire les grands projets spatiaux des deux prochaines décennies, qui ouvriront des perspectives de recherche de vie primitive dans les planètes extrasolaires. Au total, il est clair, équilibré, et il a l'originalité et le mérite de comporter des exercices : c'est un ouvrage utile pour les étudiants, les enseignants, les jeunes astronomes, ainsi que pour les scientifiques de disciplines connexes, de la biologie à la physique, qui voudraient s'orienter dans ce vaste sujet.

Tout autre, enfin, est le livre d'A. Vidal-Madjar, *Il y eut des planètes*. Il est doublement personnel, par son style et par le choix des sujets traités. L'auteur a eu un rôle déterminant dans l'étude du disque de poussière autour de l'étoile bête de la constellation du Peintre, l'une des premières étoiles autour de laquelle on a soupçonné la présence de planètes (sans en détecter clairement, toutefois). Il a délibérément rompu avec ce que l'on nomme (selon les préférences personnelles) le style sérieux ou rébarbatif. Il expose dans un style amusant, facile, un appel à ce qu'il appelle l'intuition (en fait, l'expérience courante), les idées sur la formation des planètes extrasolaires et les méthodes pour les détecter. Deux des chapitres se focalisent sur les activités personnelles de l'auteur : l'étude de l'étoile bête du Peintre et l'exploration des lentilles gravitationnelles. Le livre se termine par l'interrogation «Y a-t-il de la vie sur

les planètes extrasolaires?», mais il ne dit rien des grands programmes spatiaux, européens ou américains, qui étudient cette question et sur lesquels se fondent pourtant beaucoup d'espoirs. Soulignons aussi que le livre est à l'opposé d'une mode répandue dans la communauté des astronomes : il ne se laisse pas aller à un mirisme pseudo-mystique, qui fait croire, à tort, que l'Univers est doué d'une harmonie. Fourmillant d'anecdotes, il devra susciter des vocations chez les lycéens épris d'aventure.

La bibliographie sur le sujet passionnant de la quête des planètes et de la vie extrasolaires sera complète si, à ces trois ouvrages, on ajoute : *Invitation aux planètes* (D. Benest et C. Freschlé, ESKA, 1999), *Planets du Soleil* (A. Brahic, Éditions Odile Jacob, 1999), *Planet Quest : the Epic Discovery of Alien Solar Systems* (K. Crowley, 1997, 1998, 1999), *Life on other Worlds* (S. Dick, Cambridge University Press, 1998), *What the Stars Hide* (D. Goldsmith, University Science Books, 1997), *The Search for Life on other Planets* (E. Jacoksky, Cambridge University Press, 1998) et *La biogéochimie* (F. Rost, F. Bardin, Garmy et J. Schneider, Que Sais-Je, PUF, 1997).

Jean SCHNEIDER

Agronomie

Tais-objet et mange

Guy Paillotin et D. Rousset. Éditions Bayard, 1999

Guy Paillotin, président de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA), définit l'agronomie comme la science de la proximité et du quotidien, en raison de ses liens avec l'agriculture et des répercussions que ses techniques ont sur l'alimentation. En effet, quoi de plus quotidien, mais en même temps de plus personnel et de plus représentatif de notre mode de vie, que ce que nous choisissons pour garnir notre assiette!

Évoquant constamment, d'une façon humaniste, les rapports de l'homme à la nature, il donne la parole au consommateur. Un consommateur qui n'est pas fataliste face aux organismes génétiquement modifiés (OGM), à la vache folle ou, tout simplement, à la tomate insipide. Un consommateur qui réclame le droit d'intervenir dans l'ensemble de la chaîne qui passe par le chercheur, l'agriculteur, l'industriel et le distributeur.

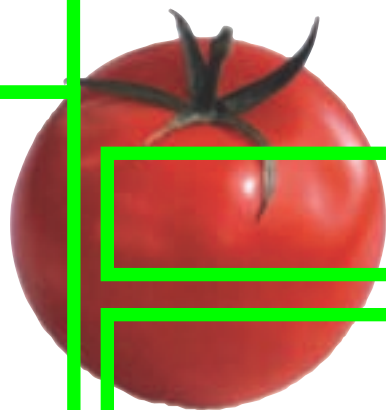
Cette reconnaissance des droits du consommateur donne intelligibilité et cohérence à ce livre, dont on doit partager le constat : les consommateurs n'ont pas, comme au sortir de la guerre, des produits en abondance et à bas prix, mais, de plus en plus, des produits de qualité, chargés d'une part de rêve. Mais qu'est cette « qualité », qui n'est jamais vraiment définie ? Si l'on redonne la parole au citoyen consommateur, un produit est de qualité s'il est conforme aux attentes et vendu à un prix admissible.

Cette définition abolit la différence artificielle entre l'agriculture dite de masse, et l'agriculture dite de qualité. Même un marché tel que celui des céréales, considéré comme un marché de masse, mérite une appréciation tout en nuances ; il peut se segmenter tout autant que le marché du vin, marché de référence en matière de qualité. Je me souviens des explications du président du Conseil australien des céréales (qui marquent l'existence, en Australie, de 40 classes de blé, correspondant à autant de marchés spécifiques à l'exportation vers les divers pays d'Asie. Plus généralement, l'agriculture est multiple, ses marchés aussi. Ne réduisons pas cette diversité à une opposition stérile entre une agriculture tournée vers la grande exportation et une autre, qui se consacrerait au consommateur européen.

Le président de l'INRA indique avec raison que les objectifs fixés à notre agriculture vont aujourd'hui au-delà de la production de produits sains et de qualité : on doit aussi prendre en considération l'aménagement du territoire, l'environnement, l'emploi. Si tel est bien le cas, le contrat entre l'agriculture et la nation doit être clair. On ne peut, aujourd'hui, que regretter le grand écart entre une Politique agricole commune, qui aligne progressivement les prix européens sur les prix mondiaux, en augmentant les aides directes versées aux agriculteurs, et une politique nationale qui, par la Loi d'orientation agricole, exprime le souhait d'une agriculture multifonctionnelle, ancrée sur le territoire. La politique européenne pousse à l'agrandissement des exploitations et à la recherche incessante de gains de productivité, tandis que la France prône d'ailleurs l'installation de jeunes agriculteurs et plus de respect de l'environnement.

Quel modèle de développement souhaite notre pays pour son agriculture ? Les acteurs politiques sont responsables de ce choix, mais ils mériteraient certainement de bénéficier d'un éclairage de la recherche sur l'efficacité économique des politiques à mettre en œuvre. Or cet éclairage reste souvent trop discret.

De même, G. Paillotin indique que les scientifiques doivent sortir de leur isolement et prendre conscience du décalage



Ces quelques années, la tomate insipide avait cristallisé les critiques des consommateurs. Elle est aujourd'hui remplacée par le maïs (transgénique), le bœuf (malade), les fromages et les œufs (contaminés).

qui s'installe entre eux et les utilisateurs de leurs travaux. Si l'on souhaite que l'agriculture française prenne pleinement en compte la recherche constante sur la qualité et la préservation de l'environnement, il est grand temps de se pencher sur les problèmes de diffusion des sciences et des techniques, et d'analyser finement la chaîne du progrès. La synergie entre les instituts de recherche, les instituts techniques et les conseillers du terrain mérite aujourd'hui d'être améliorée, pour que nous puissions réellement faire valoir notre modèle de développement.

Alain MOULINIER

Biologie

La mystique de l'ADN

Dorothy Nelkin et Susan Lindee.
Éditions Belin, 1998.

La part des gènes

Michel Morange. Éditions
Odile Jacob, 1998.

Le Gène nous fascine exagérément, en bon sens comme en mal. Entre le « chromosome du crime », le « gène de l'homosexualité » et l'« hérédité », il ne se passe guère de semaine sans que les gros titres de la presse, y compris scientifique, en témoignent. Ce constat motive deux livres complémentaires : *La mystique de l'ADN*, de D. Nelkin et S. Lindee, et *La part des gènes*, de M. Morange.

Le premier décrit la perception populaire du rôle des gènes, sans se soucier

de la validité scientifique de cette perception. Il analyse les discours véhiculés par les médias afin de dégager les grandes tendances de la sacralisation contemporaine du Gène (ce que l'historien des sciences André Pichot nomme la « génétomanie ») et, surtout, afin d'en comprendre les origines et les enjeux idéologiques.

Le second ouvrage tente de cerner scrupuleusement, gène par gène, ce qui est aujourd'hui connu du rôle des gènes dans le fonctionnement du vivant, et ce qui ne l'est pas. Par exemple, que sont réellement les « gènes de maladie » ? On mesure l'attrait de ce langage réductionniste en le comparant à une expression plus rigoureuse comme « gène codant une protéine dont une mutation particulière conduit à une maladie ». À quoi il faut ajouter qu'une autre mutation du même gène conduirait à des symptômes bien différents et que certaines mutations ne produisent leur effet délétère que dans des conditions précises. L'expression « gènes du comportement » – agressivité, intolérance au lactose ou homosexualité, de nos jours, tout y passe – est encore plus trompeuse. M. Morange démonte patiemment les réseaux d'interactions moléculaires et crée le lien entre la causalité qui va du génome à l'organisme. Il s'interroge également sur les raisons de la fascination qu'exerce ce qui n'est, en somme, qu'un niveau particulier d'organisation biologique, pour tenter de le démystifier. D'où vient la suprématie accordée si facilement aux gènes, sans commune mesure avec leur place réelle dans la hiérarchie du vivant ?

La sagesse populaire n'a pas attendu les généticiens moléculaires pour affirmer que « son sang ne saurait mentir ». Dorothy et S. Lindee montrent comment elle se nourrit des concepts scientifiques du moment, notamment à travers la propagande eugéniste de la première moitié du XX^e siècle. L'ADN n'a fait qu'occuper une place déjà chaude. La vieille notion de Destin trouve aussi, dans le déterminisme génétique, un ressort plus moderne que le thème astral. Plus subtilement, l'évolution de la société occidentale explique pourquoi les explications « par les gènes » rencontrent aujourd'hui un tel écho : repli sur une identité individuelle, sur des liens biologiques, face à l'éclatement familial et aux fractures sociales ; accent mis sur la responsabilité de l'individu face à l'échec des programmes sociaux... La violence n'est ainsi plus perçue comme un agent infectieux, qui contamine un groupe défavorisé, mais comme une prédisposition génétique individuelle, à repérer le plus tôt possible et à traiter indépendamment du contexte social. En médecine du travail, la pratique de tests génétiques de

POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
<http://www.pourlascience.com>

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger. Hervé This (Rédacteur en chef), Françoise Ciotti (Rédactrice en chef adjointe), Bénédicte Lemerq (Rédactrice en chef adjointe), Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot, Loïc Mangin (Rédacteurs). Secrétariat de rédaction : Annie Tacquet, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Marketing et publicité : Séverine Merviel et Marie Hubert. Direction financière : Anne Gusdorf. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Bénédicte. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Lucie Romier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Jean Cophignon, Paul Decaix, Hervé Delingette, Isabelle Dusart, Marc Fermigier, Jean-Claude Galey, Évelyne Hoste-Platret, Véronique Moinet-Hélin, Pierre Mounier-Kühn, Claude Olivier, Christophe Pichon, Roseline Talbot.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors: Michelle Press, Mark Alpert, Timothy Beardsley, Carol Ezzell, Wayt Gibbs, Alden Hayashi, Kristin Leaveller, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman: John H. H. Co-Chairman: Rolf Grisebach. President and Chief Executive Officer: Joachim Rossler. Vice-President: Frances Newburg.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger: Kate Dobson, 415 Madison Avenue, New York, N.Y. 10017 - U.S.A.
Tél. (212) 754 02 62

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Grémion : 01 55 42 84 04.

SERVICE VENTE RÉSEAU NMPP

Marie Hubert

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE

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

Suisse : Seridis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - V - Bogis

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

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 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 adressés 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, de citation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence

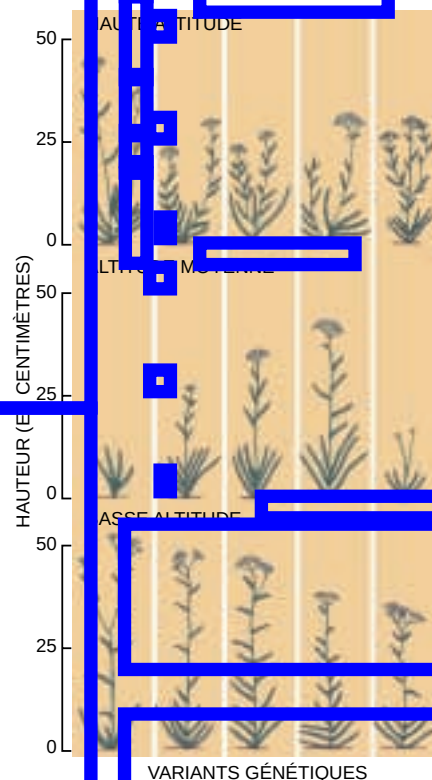
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

susceptibilité pourrait obéir à la même logique. Plutôt qu'assainir l'environnement de travail, on n'y introduirait que des employés résistants.

Les deux ouvrages soulignent que les biologistes, bien qu'ils se plaignent des médias qui déformeraient leur pensée et leurs propos, participent à la mystique de l'ADN. Délibérément, quand ils usent de métaphores alléchantes afin de justifier les budgets alloués aux grands programmes de séquençage : «décrypter le grand livre de l'Homme», ou «la quête du saint-Graal». Par réductionnisme sans doute excessif, en tout cas, prématuré, quand ils posent des étiquettes telles que «maniaco-dépression» ou «dyslexie» sur des régions particulières d'un chromosome. Ou encore par simple commodité de langage, quand ils parlent d'une «mutation de la schizophrénie» plutôt que de la «localisation d'un gène de susceptibilité» à cette maladie (localisation d'ailleurs assez approximative).

Cependant, le plus intéressant, et qui mériterait un ouvrage à lui tout seul, c'est que la nature même des gènes encourage les chercheurs dans cette voie. Ainsi que l'écrit M. Morange : «La biologie contemporaine laisse aux gènes une place prépondérante, non de principe, mais de pratique expérimentale, tant pour l'étude des êtres vivants que pour leur éventuelle modification.» Il est tellement plus facile de manipuler un génome que de prévoir (ou même de comprendre après coup) comment ces manipulations modifient le fonctionnement des protéines dont la structure est ainsi altérée, quelles en sont les conséquences sur l'organisme dans son ensemble sans parler de l'écosystème auquel il appartient. Quelques mois suffisent pour créer un nouvel «organisme génétiquement modifié» (OGM), mais l'évaluation de l'impact de cet OGM sur l'environnement demande des années. Quelques mois ou quelques années peuvent suffire à caractériser un gène qui intervient dans une maladie, que l'on dépense alors plus efficacement, mais la compréhension des mécanismes d'action de la protéine correspondante (et *a fortiori* la mise au point d'une thérapie qui en découle) peut demander des décennies. Les programmes de séquençage systématique du génome humain ont creusé ce décalage entre diagnostic et traitement.

La génétique malade, en somme, est une vité futile, incapable de nous éclairer vraiment sur le fonctionnement du vivant. Bien que M. Morange n'y croie pas beaucoup, peut-être la connaissance de génomes entiers révélera-t-elle même des principes d'organisation nouveaux,



Les bouquets d'achillée se développent différemment selon l'environnement, bien qu'elles aient les mêmes gènes. Si les plantes réagissent ainsi, comment espérer prévoir les conséquences exactes des gènes humains sur le comportement ?

qui étaient insaisissables à l'aide des bribes éparses, disponibles jusqu'à maintenant. Cependant la génétique moléculaire a ses limites, à commencer par celles qu'impose un niveau d'intégration qui apparaît de plus en plus comme essentiel à la cellule. Un génome nu, isolé, est inouïssant. Le message semble trivial : «Les gènes ne déterminent pas les propriétés du vivant, ils y contribuent.» Cette évidence mérite d'être rappelée, face à la puissance opératoire du gène, et aux intérêts économiques qu'elle suscite et qui la font servir en le manipulant, accélérant le développement de techniques de plus en plus performantes. Désacraliser «le gène devenu une notion de référence courante, que l'on invoque trop facilement [...] et dont on se sert trop souvent de façon néfaste pour atteindre des objectifs équivoques ou socialement destructeurs, c'est faire œuvre de salut publique.

André KLARSFELD

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>