

■ POUR LA SCIENCE

Avril 1997

édition française de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

Immunothérapie
des cocaïnomanes

Les galaxies fantômes

Le Néolithique au Sahara

L'interférométrie radar

La forme du tambour

L'alphabet au Japon

La communication
des bactéries



L'expérimentation animale

Bloc-notes de Didier Nordon

Tribune des lecteurs

Jeu-concours

Conversation de mathématiciens
par Pierre Tougne

Science et finance

Les tendances du hasard?
par Christian Walter

Point de vue

L'indispensable médiatisation
par Alexandre Meinesz

Les inattendus de la science

Les inattendus des fractales
par Benoit Mandelbrot



Présence de l'histoire

La mystification d'Alan Sokal
par Pierre Thuillier

Science et gastronomie

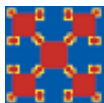
Questions de frites

Perspectives scientifiques :

La faille du tunnel de Toulon
Bactéries thermophiles
Mini-grenouille
Les mystères de la fécondation
De l'essence au lisier
Points chauds
Nager pour vivre
Les haies et les bosquets
Un réseau quantique
Les oscillations de Bloch

Savoir technique

Les machines à sous



Visions mathématiques

Sable et géométrie
par Roger Iss



L'expérience du mois

Le briquet pneumatique
par Paul Boutié et Ioannis Manos



Analyses de livres

– *Calcul scientifique*, Lionel Sainsaulieu
– *Introduction au calcul scientifique*, Brigitte Lucquin et Olivier Pironneau

– *Le prix du bien-être*, Edouard Zarifian
– *Longitude. L'histoire vraie d'un génie solitaire qui résolut la plus grande énigme scientifique de son temps*, Dava Sobel
– *Toutes les tortues du monde*, Frank Bonin, Bernard Devaux et Alain Dupré

Débat

L'expérimentation animale : utilité et éthique 33

par Andrew Rowan

Les expériences menées sur les animaux sont au cœur de la recherche biomédicale. Quel est leur coût? Quel est leur intérêt?

Leurre et gaspillage 34

par Neal Barnard et Stephen Kaufman

Les conditions des expérimentations animales sont trop artificielles pour reproduire celles d'une maladie humaine.

Progrès et sécurité 37

par Jack Botting et Adrian Morrison

L'efficacité des médicaments et des protocoles opératoires est validée par l'expérimentation animale.

L'expérimentation vitale 40

par Pierre Tambourin

L'expérimentation animale fait progresser la biologie et la médecine, mais elle doit être acceptable sur le plan éthique.

L'évolution de l'expérimentation animale 42

par Madhusree Mukerjee

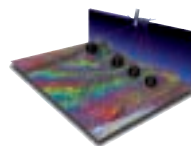
que et le public se préoccupent de plus en plus du bien-être des animaux, ce qui modifie les conditions de leur utilisation par les chercheurs.



L'interférométrie radar par satellite 48

par Didier Massonnet

Des radars en orbite à des centaines de kilomètres de la Terre détectent de faibles mouvements de sa surface.



L'émergence précoce du Néolithique au Sahara 56

par Ginette Aumassip

Il y a plus de 9 500 ans, dans le Sahara, des hommes prennent conscience qu'ils peuvent agir sur leur environnement.

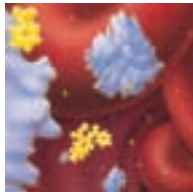


L'immunothérapie des cocaïnomanes

par Donald Landry

De nouvelles substances, dérivées de molécules fabriquées par le système immunitaire, combattraient les effets de la cocaïne.

64

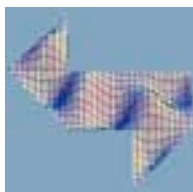


Les tambours liquides

par Maria Brazovskaia, Catherine Even et Pawel Pieranski

La mesure des fréquences de vibration de la peau d'un tambour en cristal liquide confirme que des formes différentes donnent parfois les mêmes fréquences : on ne peut pas entendre la forme d'un tambour !

68



Les galaxies fantômes

par Gregory Bothun

En dix ans, les astronomes ont découvert plus d'un millier de galaxies géantes de faible luminosité. Cette population modifie nos idées sur l'évolution des galaxies et la répartition de la masse dans l'Univers.

84



La communication des bactéries

par Richard Losick et Dale Kaiser

Les bactéries échangent des messages chimiques entre elles, ainsi qu'avec les plantes et les animaux. Ce besoin de communiquer expliquerait l'extraordinaire variété des molécules synthétisées par les micro-organismes.

76

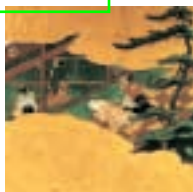


L'introduction de l'alphabet latin au Japon

par Florian Coulmas

Les Japonais s'étonnèrent de l'écriture alphabétique des premiers Européens admis dans leur pays, au XVII^e siècle. Aujourd'hui encore, l'alphabet européen leur semble une modernité exotique.

90



La science de la loi de Murphy

par Robert Matthews

Les désagréments de la vie quotidienne ne sont pas le fruit du hasard : la vérité est que le monde entier vous en veut personnellement.

100



Le naturel et l'artificiel

Le romantisme est une perpétuelle tentation. Le retour à la nature, un désir récurrent. Voyez-vous une chemise en coton aux couleurs «naturelles» dans un étalage : ne vous semble-t-elle pas plus confortable que la chemise voisine, aux couleurs «artificielles» et en fibres synthétiques? Le naturel est une qualité qui s'attache à notre âme et la force d'aimer.

Ce qui dérange, c'est que ce manichéisme, le bon naturel opposé au mauvais artificiel, est d'appréciation délicate. Le coton a été transformé par sélection depuis que l'homme le cultive : il est bien différent de ce que l'évolution avait fourni aux premiers Égyptiens. La plante est protégée et alimentée par des insecticides, des herbicides, des engrais, qui n'existent pas à l'état de nature. Après la récolte – mécanisée –, ses fibres sont traitées dans des machines industrielles qui cardent, filent et tissent. Les colorants qui la teintent, les additifs chimiques qui en renforcent l'éclat et la texture, n'apparaissent pas explicitement dans la chemise finie. Même si les colorants ont les mêmes structures chimiques que les molécules naturelles, la différence est qu'ils sont confectionnés à partir de dérivés du pétrole.

Le grand mot est lâché : la fibre synthétique la plus connue, le Nylon, est confectionnée à partir d'acide adipique et d'hexaméthylène diamine, extraits du pétrole. Donc le Nylon est artificiel. Or ce pétrole est d'origine tout à fait naturelle : il est le résultat de la transformation de plantes accumulées dans les sédiments pendant des centaines de millions d'années. Si le pétrole est d'origine végétale, et si le coton est traité, où est la différence de nature?

Ces arguments frisent le sophisme et paraissent plaider en faveur de l'industrie chimique. Tel n'est pas le propos. La constatation est plus incisive : les artisans ingénieux modifient les produits naturels en fonction de leurs besoins et, si le qualificatif d'artificiel est «ce qui passe par une usine de traitement», il n'existe plus de produits naturels. Pourrait-on quantifier les transformations des matériaux pour établir un degré de naturalité, comme le suggère le chimiste Roald Hoffmann? Tâche difficile. Chassez l'artificiel, il revient au galop...

Il n'empêche, notre âme, romantique, nous incite à préférer le coton au Nylon, le bois au plastique, le paysage au chromo. Tant que nous savons les distinguer.

Philippe BOULANGER

Vers un manque de pots ?

Extrait d'une lettre envoyée par le ministre de la Recherche au directeur général du CNRS. «Vous avez bien voulu attirer mon attention sur un point qui, si nul remède n'y était apporté, pourrait rapidement devenir inquiétant : la tendance à l'embonpoint constatée chez trop de chercheurs. L'origine de ce regrettable phénomène réside sans nul doute dans le nombre excessif de pots de thèse auxquels ils participent. Je vous prie donc de faire en sorte que le maximum de deux pots de thèse par jour et par université ne soit en aucun cas dépassé. À cette fin, et pour diminuer le nombre de thèses, vous veillerez à relever suffisamment le niveau exigé des candidats avant qu'ils ne soient autorisés à soutenir.»

La nature imite l'art

C'est un malheur, j'imagine, pour les archéologues qui s'y étaient trompés, d'apprendre que les peintures sacrées trouvées dans une grotte du mont Bego (Alpes-Maritimes) ne seraient finalement pas des peintures, mais des lichens ou des algues ayant poussé selon des formes régulières.

C'est un bonheur, j'imagine, pour les peintres modernes d'apprendre qu'une telle confusion a été possible. Depuis les visiteurs péremptoires qui affirment : «Moi aussi, je peux faire n'importe quoi, et appeler ça de l'art moderne !», jusqu'au fameux âne Boronali dont la queue, trempée dans la peinture et promenée au hasard sur une toile,

produisit un effet qui fut pris pour une œuvre véritable – tout semblait démontrer que les artistes modernes étaient d'exceptionnels fumistes.

La preuve est désormais faite : les artistes d'autrefois ne valaient pas mieux, puisqu'on a pu prendre pour des têtes humaines peintes par eux de simples lichens ayant poussé en cercle. Sans doute, un jour, entendra-t-on des visiteurs s'exclamer : «Moi aussi, je peux faire n'importe quoi, et appeler ça de l'art pariétal !»

Le juste et l'aléatoire

Summa jus, summa injuria, disaient les Anciens. Ils avaient tout prévu...

Dans mon université, les mathématiques recrutent cette année deux maîtres de conférences. Le nombre de candidats est de 150. Cette proportion, banale en nos temps de chômage et de restrictions, place la commission de choix dans une situation étrange. Quoi qu'elle décide, elle est certaine d'agir de façon parfaitement juste et injuste à la fois.

Parmi les 150 candidats, il y en a en effet 30, 40, 50 peut-être qui sont excellents. Il faudrait que la commission agisse en dépit de tout bon sens pour ne pas choisir les élus parmi ceux-là. Mais, quels que soient ces deux élus, la commission aurait pu en choisir deux autres, qui auraient été exactement aussi dignes du succès.

Ma conclusion est que, si, après le premier tri, la commission s'en remettait au tirage au sort, elle n'agirait probablement pas plus mal, elle perdrait sûre-

ment moins de temps, et elle se ferait peut-être moins d'illusions sur elle-même.

Je n'oserais pas cette suggestion, si un illustre devancier n'avait ouvert la voie. Le mathématicien André Weil, dit-on, prônait le recours à l'aléatoire pour les examens. Parmi les candidats, on sait *a priori* qu'un tiers sera reçu quel que soit le sujet, et un tiers collé. Quant au troisième tiers, tout dépend pour lui du hasard qui fait ou non sortir tel sujet. Alors, dans ce troisième tiers, autant tirer au sort les reçus. En plus, cela éviterait les copies à corriger. Weil allait jusqu'à suggérer aussi qu'on tire au sort les résultats retenus pour publication dans les revues de recherche. Les mathématiques ne sont pas les ennemies de la paresse.

Les euros sont fatigués

Nos dirigeants nous houspillent : le changement d'unité monétaire est pour bientôt, et nous ne nous préparons pas.

Nos dirigeants ont raison. Soyons sérieux : préparons-nous. Quels effets le remplacement du franc par l'euro aura-t-il ?

D'abord, les petits enfants – à force d'entendre des phrases comme : «Je n'ai pas un euro sur moi» ou «Je suis à sec, je n'ai plus un euro» – les petits enfants croiront que l'unité s'appelle le neuro ; ils en déduiront qu'un neurologue est un conseiller financier. Il faudra les détromper. En grandissant, familiarisés avec le pluriel, ils changeront de liaison : deux-z-euros, trois-z-euros, les-z-euros sont arrivés. D'où, devenus adultes, des formulations plaisantes. Par exemple :

– Alors, il te l'a donnée, ton augmentation, le patron ?

– Tu parles, oui. Zéro zeuro, il m'a accordé.

Ce qui prouve au passage que zéro est une forme de pluriel tout à fait singulière.

Ni neuro ni zeuro, les journaux emploieront le terme correct : euro. Lequel, Dieu soit loué, leur autorisera ces titres spirituels dont ils raffolent. Le cours de l'euro réagit-il vivement à quelque événement ? L'euro tique. Les marchés financiers européens embarrassent-ils leurs rivaux américains et japonais ? La zone euro gêne. Le cours de l'euro est-il artificiellement maintenu ? L'euro ment ou, si on préfère les assonances aux jeux de mots, L'euro leurre. Ce n'est là qu'un avant-goût. Je sens que nous allons en voir bien d'autres... Heureux euro, heureuse Europe !

Le meilleur des mondes

Telle théorie trouve tout à coup une application dans un domaine qui en semblait très éloigné ; ainsi, la théorie des groupes en physique ; la topologie ou la théorie de l'information en biologie moléculaire. Faut-il se réjouir ?

Cela dépend. L'optimiste dira : «C'est merveilleux. Pour que, 50 ou 100 ans après sa naissance, cette théorie trouve une application inattendue, imprévisible pour ses auteurs, c'est que, vraiment, ils avaient touché du doigt une vérité profonde.»

Le pessimiste dira, au contraire : «C'est terrible comme nous sommes conditionnés. Nous avons trouvé un outil puissant. Du coup, nous sommes incapables d'interpréter un problème neuf autrement que par le biais de cet outil ancien. Ce sont nos lunettes qui déterminent ce que nous voyons, pas la réalité. Incapables d'assimiler le nouveau, nous le ramenons toujours au déjà connu.»

Entre celui qui accepte le réductionnisme et celui qui le refuse, il y a toute la différence entre l'optimiste et le pessimiste. Autant dire que ces deux types d'esprits sont inconciliables.

Ignorance (para) normale

Dans *Le paranormal ignoré* (voir «Bloc-Notes», *Pour la Science*, février 1997), Didier Nordon fait référence à un article de Bertrand Méheust. Celui-ci écrit, entre autres, qu'«il n'est pas de plus puissant tabou, dans le domaine de la connaissance, que l'interdit sur la métapsychique» et que les scientifiques ne se donneraient plus la peine d'examiner ces phénomènes dans des revues prestigieuses.

La science n'est pas un «univers fermé». C'est, au contraire, l'échange d'arguments et l'expérimentation. Les savants du paranormal n'apportent toutefois aucune expérimentation qui viendrait corroborer leurs théories. La communauté scientifique devrait-elle faire ces expériences à leur place ?

Les parapsychologues et autres adeptes des sciences occultes semblent oublier les nombreux cas de fraude et de ridicule notoire qui ont caractérisé ces sciences occultes en général et la parapsychologie en particulier. Cette dernière s'est distinguée par l'affaire Uri Geller, un illusionniste qui, pour des raisons commerciales, se prétendait en relation avec des puissances extranaturelles. Un deuxième cas, de ridicule plus que de fraude, est celui de Rhine. Fondateur de l'Institut de parapsychologie de Durham, Rhine a cru qu'un cheval pouvait lire ses pensées. Il était en réalité abusé par le propriétaire du cheval. C'est un illusionniste qui a démasqué l'affaire. Rhine n'a d'autre part guère publié que les observations qui corroboraient ses dires. Quant à son successeur, Levy, il a été prié de démissionner pour fraude : il avait falsifié des données.

La fraude n'est pas le propre des sciences occultes. Elle existe également en science, à la différence toutefois que la connaissance scientifique est bâtie sur un grand nombre d'expérimentations et que ce ne sont pas quelques cas de fraude qui altèrent la validité de ce grand nombre d'expériences. En parapsychologie, c'est l'inverse : il y a très peu d'expériences concluantes et, quand il y en a, on constate qu'il y a des problèmes de fraude.

Pierre DEBUSSCHERE, Bruxelles

Bertrand Méheust, relayé par D. Nordon, somme la science, entité abstraite, ou les chercheurs scientifiques, autorités tutélaires, de se prononcer sur le paranormal ignoré. Mais la science se constitue là où il y a un chercheur scientifique, nulle part ailleurs. S'il n'y en a pas à tel endroit, c'est peut-être dommage, mais c'est comme ça. Il y a dans toutes les disciplines un grand nombre de sujets inexplorés, et c'est fort heureux.

D'autre part, on ne peut interroger les sciences que secondairement à leurs découvertes, résultats et théories. C'est une position scientiste, qui fait de la science un substitut à la religion, que de prétendre qu'elle doit se prononcer sur tout.

Enfin, l'étrange n'est pas une catégorie de phénomènes. Aussi est-il normal qu'aucun savant reconnu n'accepte d'en débattre. Ou alors, il faudrait entrer dans tous les débats non scientifiques qui se présentent, comme celui sur les races humaines.

Gérard KLEIN, Paris

Réponse de Didier Nordon

La science n'est pas un univers fermé, écrit M. Debusschere. Reste que l'ouverture d'esprit n'est pas acquise une fois pour toutes : elle doit s'entretenir. Tout ce qui trouble ou fait douter contribue par cela même à raviver la réflexion et force à repenser. Si je me suis fait l'écho de la recherche menée par B. Méheust, c'est qu'elle me semble pouvoir jouer un tel rôle.

Poincaré répond à Diacu

Le problème des n corps a-t-il enfin été intégré ? Au lecteur de l'article de Christoph Pöppe (voir *Le prix immérité*, *Pour la Science*, février 1997) qui serait tenté de répondre par l'affirmative, je soumets ces quelques rappels d'histoire.

Depuis les travaux de Cauchy, on sait «intégrer» le problème des n corps de la manière suivante. Les positions et vitesses des corps à un instant t_0 étant données, on forme d'abord les séries de Taylor représentant ces quantités en utilisant le système d'équations différentielles. On estime ensuite leur rayon de convergence p , presque toujours fini, et l'on calcule enfin les nouvelles positions et vitesses à l'instant $t_0 + p/2$, par exemple. Cauchy estimait «les calculs très pénibles» et «la convergence [...] très lente». On peut néanmoins réitérer le processus, ce qui mène en principe sans encombre aux limites du mouvement (temps infini, collision ou pseudo-collision). Peut-on éviter les itérations et former une série qui représente le mouvement tout entier ?

Poincaré répondit en 1886 : «Si l'on était sûr à l'avance que la distance de deux quelconques des trois corps restera toujours supérieure à une limite donnée, on pourrait affirmer que les coordonnées des trois corps peuvent être développées en séries toujours convergentes.

Je ne crois pas toutefois qu'on puisse tirer grand parti des applications de cette méthode

à la mécanique céleste. Je n'ai voulu, je le répète, que donner un exemple.»

Il ajouta en 1900 : «Une pareille intégration est d'un caractère bien différent et évidemment beaucoup moins satisfaisante pour l'esprit que l'intégration des équations linéaires par les fonctions fuchsienues.»

Sundman en 1913 et Wang en 1990 ont montré qu'on pouvait étendre le champ d'application de la méthode esquissée par Poincaré. Leur analyse s'applique aussi quand on ne sait pas minorer la distance de deux quelconques des corps. Les deux auteurs ont en effet proposé deux stratégies fort intéressantes pour contourner les difficultés causées par les collisions. Mais leurs séries s'obtiennent par des calculs plus pénibles que ceux envisagés par Cauchy, et la convergence est prodigieusement lente. Poincaré n'avait pas jugé sa méthode digne d'être proposée au prix du roi de Suède en 1889, et il est clair qu'il n'aurait pas changé d'avis s'il avait pris la peine de la compléter par une analyse ressemblant à celles de Sundman ou de Wang.

Alain ALBOUY, Paris

La polémique

Dans *Les divas donnent le la* (voir *Pour la Science*, février 1997), Niccolò Scotto di Carlo s'interroge sur la nature des doléances des chanteurs : «Gêne réelle ou caprice de diva ?» Elle néglige un mécanisme fondamental de la voix : il s'agit d'un système asservi, qui modifie des paramètres en fonction de la valeur instantanée de variables. Il recherche un maximum d'effet pour un minimum d'effort. Comme le chanteur a fort à faire sur scène, il utilise un paramétrage établi pendant les répétitions. Si les variables d'environnement sont stables, il chante tranquillement. Si, en revanche, les paramètres varient lentement dans le temps, le chanteur est obligé de modifier en permanence sa place vocale, ce qui le fatigue physiquement. De surcroît, il est souvent impossible d'opérer les adaptations avant la représentation, d'où la difficulté des opéras où il faut chanter le «grand air» en entrant en scène.

En négligeant cela, N. Scotto di Carlo est obligée de trouver une autre explication. Toutefois, pour les cordes vocales, 130 vibrations de plus ne sont pas équivalentes, du point de vue de la fatigue, à 130 tractions sur une barre fixe : il ne s'agit pas d'effort musculaire, mais de vibration de membranes. En outre, comme 130 ce n'est pas beaucoup, N. Scotto di Carlo évoque un contre-*fa* tenu en moyenne dix secondes, ce qui, à ma

connaissance, n'existe pas dans le répertoire. Le problème des aigus, pour un chanteur, n'est pas une question de fréquence, mais une question de pression sous-glottique, ce qui n'a rien à voir.

Eric GOROUBEN

Réponse de N. Scotto di Carlo

Le ton polémique d'Eric Gorouben est un bon exemple de l'incompréhension qui peut régner entre les représentants des différentes disciplines scientifiques lorsqu'ils abordent des sujets communs, de leurs points de vue respectifs. Le fait que la mécanique vocale soit assimilable à un système asservi n'est une révélation pour personne. Quant à la démonstration qu'E. Gorouben tente de faire, elle n'est ni très explicite ni très convaincante. Mon propos n'a jamais été d'assimiler la vibration des cordes vocales à des tractions sur barre fixe! Je précise au passage que ce qui vibre ce ne sont pas des «membranes», mais des muqueuses...

En outre, il s'agit bel et bien d'effort musculaire et par conséquent de fatigue physique, non pas au niveau des cordes vocales, mais de la pression subglottique que les chanteurs engendrent et entretiennent tout au long de l'acte vocal, à l'aide d'une forte mobilisation de la musculature abdominale et pelvienne. Dans la mesure où la pression subglottique augmente avec la fréquence, 130 hertz de plus par seconde représentent un effort physique supplémentaire non négligeable. Quant à affirmer que «le problème des aigus pour un chanteur n'est pas une question de fréquence», j'en laisse l'entière responsabilité à E. Gorouben. Les artistes lyriques apprécieront sûrement...

En ce qui concerne l'interprétation (à ne pas confondre avec le répertoire), dont relève la durée effective d'un point d'orgue, il suffit, sans même avoir recours à des appareils de laboratoire sophistiqués, de chronométrer des contre-notes dans différents enregistrements d'ouvrages lyriques pour constater qu'elles sont généralement tenues de 6 à 14 secondes, ce qui n'a rien d'aberrant lorsqu'on sait que les tests phoniatriques (destinés à des sujets non chanteurs) fixent la durée moyenne de vocalisation à 20 secondes après inspiration forcée.

Retrouvez la Tribune de Pour la Science sur Internet à l'adresse <http://www.PourlaScience.com>, ou directement par courrier électronique à 101641.3525@compuserve.com, en indiquant Tribune dans la rubrique objet.

JEU-CONCOURS

N°34

PIERRE TOUGNE

CONVERSATION DE MATHÉMATIENS

Passant devant le bureau de deux mathématiciens «diophantiens», j'ai surpris la conversation suivante : «Mon âge divise deux fois ton âge plus 17». L'autre mathématicien répondit : «Oui, mais le mien divise le tien plus quatre». Quels sont les âges entiers possibles

de ces deux mathématiciens satisfaisant à ce dialogue. Afin d'éliminer quelques solutions triviales, nous supposons que la «bosse des maths» n'apparaît chez le mathématicien qu'après un an, mais elle peut être très précoce!

Envoyez vos réponses aux questions sur carte postale à Pour la Science, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les

réponses exactes reçues pendant le mois d'avril 1997, dix gagnants tirés au sort recevront le livre *La vie dans les abysses*.

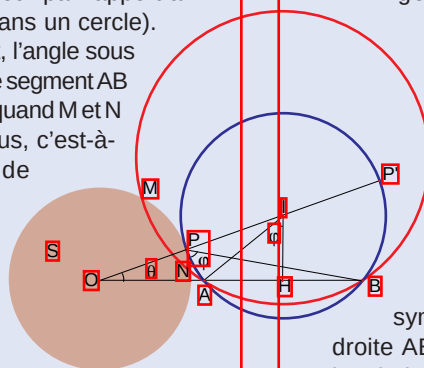
RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°32

Le problème ayant une symétrie de révolution autour de l'axe de Saturne et de son anneau, on se place dans un plan méridien où Saturne est représenté par le cercle (S) et l'anneau par le segment AB (voir la figure ci-dessous). Soit M un point quelconque de Saturne dans l'hémisphère Nord-Est. Le cercle circonscrit au triangle MAB (en rouge sur la figure) coupera en général le cercle (S) en un autre point N. Tous les points de Saturne compris entre M et N verront le segment AB sous un angle plus grand que celui de M et N (propriété classique de l'angle intérieur par rapport à l'angle inscrit dans un cercle). Par conséquent, l'angle sous lequel on verra le segment AB sera maximum quand M et N seront confondus, c'est-à-dire au point de contact P du cercle (C) passant par A et B et tangent au cercle de Saturne. Soit I son centre, on a $OA.OB = OP.OP'$ (puissance de O par rapport au cercle (C)), relation qui s'écrit si l'on note R le rayon du cercle (C),

$r_1 r_2 = r(r + 2R)$ d'où l'on tire $2R = (r_1 r_2 - r)/r$. Soit H le milieu de AB, la latitude de P est l'angle $\theta = IOH$ or dans le triangle rectangle OHI, on a $\cos \theta = OH/OI = (r_1 + r_2)/2(r + R)$ qui s'écrit après substitution de R par son expression $\cos \theta = r(r_1 + r_2)/(r_1 r_2 + r^2)$. De même, l'angle de vision maximum $\varphi = APB$ est égal à AIB et dans le triangle rectangle AHI, on a :

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= AH/OI \\ &= (r_2 - r_1)/2R \\ &= r(r_1 - r_2)/(r_1 r_2 - r^2). \end{aligned}$$

Le point P peut se construire géométriquement de la façon suivante : si T désigne l'intersection de MN avec la droite AB, TP est la tangente en P au cercle S, donc P est l'intersection du cercle de diamètre OT avec le cercle S. Naturellement, il y a aussi la solution symétrique par rapport à la droite AB. Enfin Mr. R. Osswald me signale la condition nécessaire et suffisante pour que $\theta = \varphi$: $(r_1/r)^2 + (r_2/r)^2 = 2$, qui est curieusement très simple.



Les tendances du hasard ?

CHRISTIAN WALTER

La persistance dans le temps des gains et des pertes à un jeu de pile ou face induit les analystes techniques à détecter des tendances...

Les cours viennent de franchir leur moyenne mobile courte à la hausse et les oscillateurs se sont retournés à la hausse depuis le début de l'année. Le momentum, en revanche, poursuit son recul au-dessous de ses moyennes mobiles et doit nous inciter à rester sur nos gardes. Ce type de commentaire d'un marché boursier apparaît dans nombre de quotidiens financiers : on dénomme «techniques» ces analyses de l'évolution des cours.

L'objet des analyses «techniques» est la prédiction des variations boursières futures à partir de leurs évolutions passées. Le texte cité peut décrire l'évolution du marché du cacao, du maïs, du soja, du franc, des obligations américaines ou des actions japonaises... Il s'agit de détecter dans les mouvements passés une sorte d'élan qui conduirait les cours, comme un navire sur son erre, vers un niveau futur prédéterminé par cet élan. Les analystes techniques aiment comparer leur activité avec celle des opérateurs radar qui doivent, à partir de l'examen de la trajectoire d'un missile, extrapoler le point de chute... Mais les

variations boursières sont-elles comparables aux trajectoires des missiles ?

La prévision boursière est, selon les travaux du mathématicien Bachelier, impossible, puisque les variations des cours boursiers «vrais» (les variations en capital seul, sans les dividendes) sont assimilables à des tirages aléatoires. Bachelier avait même dit, au début du siècle : le jeu est équitable, l'espérance mathématique du spéculateur est nulle. Dès lors, comment pourrait-on prévoir les cours vrais de demain ? La Bourse est aussi imprévisible que le prochain lancé du jeu de pile ou face. La seule prévision possible des cours de la Bourse ne peut donc concerner que les dividendes futurs d'une action, qui déterminent sa valeur «fondamentale», correspondant aux conditions de l'économie et de l'entreprise.

Pourtant les analystes techniques prétendent détecter, dans le passé des marchés, des configurations particulières de mouvements, des structures reconnaissables de fluctuations qui leur permettent, pensent-ils, de prévoir les évolutions à venir des cours vrais. Si Bachelier postule une imprévisibilité radi-

cale des variations boursières «vraies», les analystes techniques répondent en affirmant que les cours vrais ne fluctuent pas au hasard, puisqu'ils y reconnaissent des tendances repérables. Dialogue de sourds...

Si l'hypothèse de Bachelier est vraie, les variations boursières des cours sont assimilables à des tirages aléatoires : le marché au jour $j + 1$ ne dépend pas du marché au jour j . Pourtant, en construisant une Bourse fictive, des simulations des résultats intermédiaires des gains et pertes du spéculateur font apparaître d'importantes variations. Les analystes techniques y décèleront des «tendances» là où il n'y a que du hasard.

L'OBSERVATION N'EST PAS LA PRÉDICTION

Certaines propriétés du jeu de pile ou face contraires à l'intuition renforcent les conceptions des analystes. Au bout de combien de temps, en moyenne, le spéculateur de Bachelier se retrouve-t-il avec la même somme qu'au départ ? La réponse est que cette durée moyenne est... infinie ! Un autre résultat est que les temps de séjour dans la zone positive ou négative du jeu, qui représentent les durées pendant lesquelles notre spéculateur reste riche... ou pauvre, sont soit très brefs, soit extrêmement longs. En d'autres termes, le hasard semblera favoriser tout le temps l'un des joueurs au détriment de l'autre, alors même que le jeu est équitable !

Ce phénomène de persistance de la chance (ou de la malchance) se traduira, sur l'examen d'un graphique boursier par un analyste technique, par une impression de «nette tendance à la hausse» du marché, ou de «correction à la baisse qui va se poursuivre». Bien plus, l'analyste technique, voyant le spéculateur continuer à s'enrichir de manière constante (ou à s'appauvrir...), pourra affirmer : c'est normal, je l'avais prédit. Il détectera des «tendances» à la hausse ou à la baisse là où il n'y a que des tirages au hasard.

Les analystes techniques rétorqueront que, précisément, les marchés n'évoluent pas au hasard, que l'hypothèse de Bachelier est fautive, et que les structures variationnelles repérables observées sur les marchés sont réelles.

Les formes que cherchent à identifier les analystes techniques sont réelles du point de vue de l'observation, mais pas de la prévision. Autrement dit, la présence de tendances apparentes sur les graphiques boursiers n'est pas une raison suffisante pour rejeter l'hypothèse de «marche au hasard» des variations de la Bourse.



Une simulation de 2 000 jours de Bourse, réalisée par des tirages aléatoires au jeu de pile ou face : les analystes techniques y détecteraient des tendances (figurées en traits de couleur sur le graphique), là où il n'y a que processus aléatoire, donc sans prévisibilité.



L'indispensable médiatisation

ALEXANDRE MEINESZ

Les voies académiques de la communication, trop lentes, sont inefficaces pour alerter l'opinion.

Il y a toujours des chercheurs perspicaces au départ d'une «affaire», du sang contaminé humain au trou d'ozone stratosphérique, en passant par toutes les catastrophes intermédiaires. Ces scientifiques ont découvert un risque pour notre santé ou notre environnement et en ont évalué les conséquences. Alarmé de la menace ainsi décelée, ils souhaitent en prévenir les responsables. Comment peuvent-ils agir efficacement ? En communiquant leur diagnostic. Comment le communiquer ?

Les vecteurs classiques de l'information scientifique et technique sont les revues de spécialistes : trop souvent publiées après un long délai (plusieurs mois), elles sont décalées de l'actualité. Ensuite, bien que sérieuses, solides et référentielles, elles ne touchent pas les décideurs, car elles visent une autre cible : la communauté de chercheurs spécialisés dans une discipline restreinte. Ces lenteurs et cette adéquation n'ont pas de graves inconvénients quand il s'agit de la fusion froide, elles ont des conséquences quand l'environnement ou la santé sont en péril.

Dans le microcosme récepteur, en période de crise budgétaire, les brusques changements de thèmes de recherche ne sont pas examinés avec sérénité. Lancés sur des rails, les programmes de recherche engagés sont difficilement abandonnés ou modifiés. Décider de changer de cap, prendre en charge l'expertise d'un risque majeur pour notre société... est trop risqué.

Malgré l'inutilité de la communication dans ces revues, nombre de scientifiques se contentent d'accomplir leur fonction de chercheur conformiste dans les règles de l'art. Ont-ils raison ?

Oui, pour ce qui est de leur carrière : il est tout à fait inutile de vulgariser la connaissance ou de communiquer ailleurs que dans le circuit institutionnel.

Oui, pour ce qui est de leur tranquillité d'âme : la description d'un risque majeur impose la désignation de coupables et

engendre des conflits auxquels ils ne sont pas préparés.

Oui, en ce qui concerne leurs crédits de recherche : contredire des supérieurs hiérarchiques, s'opposer à des hommes politiques, inquiéter des bailleurs de fonds dessert l'intérêt du chercheur et celui de son équipe.

Oui, car un scientifique n'est jamais absolument certain de ses résultats, et le droit à l'erreur lui sera impitoyablement refusé.

Tout concourt, tout aspire à conserver un mode de communication déconnectée de l'intérêt des citoyens. À ce point de vue, l'examen des livres d'histoire des «affaires» est édifiant : leur introduction n'est qu'une revue bibliographique des communications scientifiques où le problème avait été très tôt exposé et où les risques avaient été évalués.

LE COURAGE INUTILE ?

Quelques intrépides s'enhardissent et avertissent les autorités compétentes. Celles-ci n'aiment pas les lettres des Cassandre : il est difficile de valoriser sa fonction par la gestion d'un problème conflictuel engendrant des drames. Lorsque notre courageux scientifique parvient, par un miracle de ténacité et une verve convaincante, à engager la concertation avec les décideurs ou les experts, la question s'embourbe dans les jeux byzantins de défense d'intérêts, de carrière ou de lobbies.

Élève-t-il la voix que l'on crée des commissions ou comités verrouillés, ayant pour objectif de montrer qu'«on» s'occupe du problème, alors qu'il ne s'agit que de gagner du temps pour diminuer la fièvre médiatique et calmer les esprits.

Aussi le rappel chronologique des «affaires» fait-il ressurgir ô combien de lettres perdues ou classées dans d'obscur dossiers. Des comités ou commissions bidules ont longuement réfléchi sur des risques sans prendre en compte l'urgence de la situation. Autant

d'«affaires», autant de témoignages d'incompréhension et de blocages entre la sentinelle scientifique qui a lancé l'alarme et le décideur des possibles préventions.

Plus téméraires et moins nombreux sont ceux qui sautent le pas et utilisent les médias. Leur attitude est souvent suicidaire tant, toute manifestation narcissique est honnie par la communauté scientifique : toute déviation du système crée opprobre et mépris. Sombrier dans la vulgarisation est, comme l'étymologie l'indique, vulgaire. La communication médiatique doit rester l'apanage des dirigeants des sciences ou des éditeurs de publications scientifiques.

Les censeurs n'ont, il est vrai, pas toujours tort. Nombre d'exemples prouvent à l'envi que les médias sont l'eldorado du charlatanisme, d'autres cas illustrent combien la médiatisation peut être le catalyseur répugnant de la pompe à crédits scientifiques.

Ayant vaincu les réticences de son milieu et ses préventions propres, notre courageux chercheur s'aperçoit vite que le terrain des médias est semé d'embûches : aux pièges amplificateurs des journalistes en quête de scoop, s'ajoute la violente et puissante réaction polémique des défenseurs des intérêts en jeu, lesquels savent utiliser cette voie de communication.

Mais — on a pu le constater — la guerre des scientifiques, des experts et des lobbies se finit toujours par une éruption médiatique. Le couvercle de la marmite finit par sauter et laisser échapper l'information trop longtemps contenue. L'indignation s'exhale alors sur un lit de scandale et d'émotion. L'issue finale s'embourbe dans le constat des dégâts, s'engluant dans des joutes juridiques interminables. La société et la science sortent perdants.

J'ai constaté avec effarement, dans le cas de *Caulerpa taxifolia*, alias l'algue tueuse, la dévaluation du fruit habituel de mon travail de scientifique : mes publications dans les revues spécialisées n'ont servi à rien. J'ai aussi constaté qu'aucune structure universitaire neutre ne pouvait prendre en compte un risque naissant pour nos sociétés ou pour l'environnement. C'est la jungle que des comités d'éthique ou des règlements déontologiques auront quelque mal à défricher.

Alexandre MEINESZ est professeur en biologie à l'Université de Nice.

Les arguments avancés ici sont examinés dans le livre du même auteur sur la prolifération de *Caulerpa taxifolia* : *Le roman noir de l'algue «tueuse»*, Collection Débats, Belin, 1997.

Les inattendus des fractales

BENOIT MANDELBROT

Les «pathologies mathématiques» de 1900 ont conduit à une description de la rugosité, avant d'être retrouvées dans des motifs décoratifs anciens.

Pour le philosophe, une découverte scientifique a d'autant plus de valeur qu'elle dérange. Les inattendus de la science révèlent à la fois l'infinie complexité du réel et les limitations dans le nombre et l'efficacité des outils. À la surprise du jeune que j'étais, mon mentor John von Neumann pensait que la science ne pouvait éviter d'être «opportuniste.» Pour s'atteler à une tâche, il faut se vider l'esprit de tout ce qui est ressenti comme «périphérique», ou comme trop ou pas assez ambitieux. Le péril n'est jamais évité et des œillères d'abord fructueuses finissent par se formaliser, devenant des barrières que l'on croit intrinsèques et permanentes. Certaines s'érigent en murailles entre disciplines-forteresse, finissant toujours par freiner le progrès.

Rappelons qu'une fractale est un objet tel que chacun de ses morceaux reproduit, en plus petit, la structure du tout. La géométrie fractale n'est plus le fruit d'un seul homme, mais cet article se limite à des développements dont j'ai été l'agent principal.

Les mathématiciens des années 1900 avaient identifié des «monstres» qui, pour citer Freeman Dyson, «étaient considérés comme importants parce qu'ils démontraient que le monde des mathématiques pures inclut une richesse de possibilités allant bien au-delà des structures simples qu'ils voyaient dans la nature. Les mathématiques du xx^e siècle fleurirent dans la croyance qu'elles étaient allées complètement au-delà des limitations que leur avaient imposées leur origine dans les sciences de la nature [mais la géométrie fractale montra] que la nature a fait la nique aux mathématiciens. Ceux du xix^e siècle avaient manqué d'imagination, mais pas la nature. Les exemples pathologiques que les mathématiciens avaient inventés pour se libérer du naturalisme du xix^e siècle se révèlent désormais être inhérents à des objets familiers

qui nous entourent. Nous n'avons pas à aller loin pour les chercher : les monstres de Lebesgue-Osgood sont la substance même de notre chair».

Ces derniers mots font écho à une idée que j'avais avancée, que lesdits monstres ne sont autres qu'un schéma de notre vascularisation.

Dans le même style, je notai en 1977 que «la chronique des sciences regorge d'histoires de sorciers et de contes de fées. Un sorcier crée un monstre, non par besoin ni par malice, mais simplement pour se prouver, ainsi qu'à ses émules, que la bête n'était point inconcevable. Le monstre lâché, les paysans lui refusent l'entrée de leurs villages, car ses traits les effraient autant qu'ils forcent leur incrédulité. Puis, un jour, une fée leur dessille les yeux : le monstre est honnête homme et tout prêt à les servir. On s'y habitue et l'on finit même par le trouver beau.

«Les villages auxquels je pense sont des disciplines scientifiques, et nos sorciers sont bien entendu des mathématiciens. Il semble féérique, et presque miraculeux – cette apparition récurrente étant chaque fois inattendue – que des mathématiques qui sont en apparence parmi les plus contre-intuitives se révèlent si souvent indispensables pour appréhender le réel ambiant. Nos grands sorciers, dont certains voient les monstres qu'ils ont créés se transformer ainsi sous leurs yeux, ne seraient que des apprentis.

«Comme les autres histoires de sorciers et de fées, celles qui adviennent aux sciences en disent sûrement beaucoup sur la nature profonde de la pensée et de la sensibilité humaine.» Le dernier alinéa de cette citation reste d'actualité, mais – inattendu nouveau – j'ai conçu des doutes sur la créativité *ab nihilo* des dits sorciers. D'innombrables lettres de lecteurs me firent vite conclure que la grande aventure que je vivais n'avait pas commencé vers 1875, mais remontait dans

la nuit des temps. Il avait paru inattendu que la géométrie fractale nous offre, entre autres cadeaux, une forme nouvelle d'art ou, tout au moins, de décoration, mais je crois maintenant que c'était tout naturel : avant d'être associées à l'austérité mathématique de 1900, les fractales existaient déjà et paraient l'art ou la décoration d'innombrables cultures de tous les continents.

Se pourrait-il même que la phrase «au commencement était le verbe» doive devenir «au commencement était l'image»? Je vois de plus en plus de fractales dans des œuvres d'art. Pour ne donner que deux exemples relatifs aux débuts de la peinture abstraite, Frantisek Kupka et Augusto Giacometti avaient pour ambition de chasser le représentatif et de ne conserver que quelque chose de sous-jacent et de plus essentiel. Or ce qu'ils conservaient, et qui anticipait souvent les mathématiques, était fractal. Bien sûr, ce n'est pas en ces termes qu'ils pouvaient le voir, puisque, avant la géométrie fractale, aucun langage n'existait pour l'exprimer.

Dans un autre ordre d'idées, des exemples de ces courbes que j'avais qualifiées de Sierpinski (voir la figure 3) abondent dans les pavements et plafonds des églises italiennes ou dans les mandalas tibétains. On trouve la régression auto-similaire qui régit les fractales, parfaitement formée, dans les traités bouddhistes zen, chez Leibniz... J'en passe.

Somme toute, pour amplifier la remarque de F. Dyson, les fractales nous montreraient plutôt que la Nature s'associe à l'art pour faire la nique à tous ceux qui se complaisent à subdiviser le domaine du savoir et du sentir en forteresses voisines, séparées et hostiles.

Il était inattendu que des dessins «réalistes» de montagnes et de nuages puissent s'obtenir au moyen de formules mathématiques et que ces formules soient extrêmement simples.

Goethe notait que «Grise, mon ami, est toute théorie, et vert l'arbre doré de la vie,» et maints poètes et philosophes nous rappellent que le pouvoir de la raison est sévèrement limité. En particulier, il était présumé que la géométrie, inéluctablement sèche et dure, devait le devenir de plus en plus. Elle pouvait fort bien représenter l'artificiel et le technique, mais décrire la richesse exubérante et «organique» de la nature était au-delà de tout ce qu'on pouvait en espérer.

L'inattendu se révéla par des images fractales qui, tout en étant totalement «artificielles» et «techniques,» ressemblent à s'y tromper à des montagnes ou à des nuages. Elles constituent un des piliers de la nature et le fondement d'une nouvelle géométrie, ce qui explique avec

quelle chaleur elles ont été accueillies par un vaste public et comment elles ont permis une quantification et un contrôle de formes qui deviennent un nouvel outil précieux pour les spécialistes de géomorphologie.

Historiquement, les images fractales n'ont pas été un corollaire de l'arrivée de l'ordinateur, mais un moteur de l'infographie. Impossible d'oublier les nuits blanches passées à produire nos premières images avec des programmes conçus pour de tout autres buts et que personne ne savait ou n'osait modifier. Prenez l'étude des côtes : tous les 64 octets, la machine s'arrêtait et, pour la faire repartir, il fallait frapper «retour.» Au matin, nous avions en main, sur une feuille tapée à la machine, une «courbe,» faite de X, O, M et W superposés. Soulagement, cette courbe esquissait la côte de la Nouvelle-Zélande ; au large (en prime) une île Bounty. L'intérieur de la côte fut rempli d'encre avant d'être publié.

Pour obtenir nos reliefs fractals, nous avons dû attendre que les résultats d'un calcul s'affichent sur un tube cathodique de laboratoire. Reprise des veillées et grande déception : les images ne nous parlaient pas. L'addition d'un plan de référence, cependant, suscita un nouvel inattendu : un semis d'îlots apparaissait au bout d'une fine péninsule, et une mer miroitait à l'horizon, film de voyage revu en rêve. L'arrivée d'une plus haute fidélité et de la couleur nous remit au travail, plein de craintes. Notre belle trouvaille se révélerait-elle le fruit d'une imagination trop fébrile, qui aurait interprété à son gré un dessin ambigu ? Inattendu et soulagement : il n'en fut rien.

UN ART QUANTITATIF ?

Il était inattendu que l'image puisse redevenir une source féconde de conjectures mathématiques aussi simples d'apparence qu'attrayantes par leur difficulté.

La preuve est au centre des mathématiques ; elles peuvent vivre pendant de longues périodes sans apport extérieur, mais, en agissant ainsi, elles se mutilent sévèrement et sans raison.

Examinons le concept de «géométrie.» Il réussissait, autrefois, à combiner la raison avec la contemplation d'images. Mais celles-ci étaient obtenues à la main ou avec des outils peu sujets au progrès, et tout le monde avait conclu vers 1950 que l'aspect visuel de la géométrie était mort, ou tout au moins à jamais stérilisé, son apport possible étant épuisé. Les mathématiques semblaient donc se diriger de façon inéluctable vers une abstraction toujours croissante.



1. Un paysage fractal.

Jeune amoureux des images géométriques, j'osais à peine espérer que ce n'était qu'une éclipse plutôt que la mort, que ce dogme philosophique ne faisait qu'extrapoler les limitations d'une technique. Cependant, c'est seulement quand j'ai contribué à faire de l'ordinateur une machine à dessiner que l'image a pu de nouveau imposer sa puissance de révélateur de faits géométriques, donc de conjectures appelant la démonstration.

Voici d'abord un exemple peu connu : définissons un amas brownien dans le plan comme la trajectoire d'un mouvement brownien entre deux retours à un point double. L'intérieur une fois noirci, le tout ne manque pas d'évoquer une île dont la côte est encore plus tortueuse que celle de la Bretagne. Mon expérience suggérerait un contour de dimension fractale égale à $4/3$. Le calcul numérique le confirmait et la saine curiosité exigeait une démonstration. Les experts se sont affairés, mais la question reste ouverte. Jamais elle n'aurait été posée sans image.

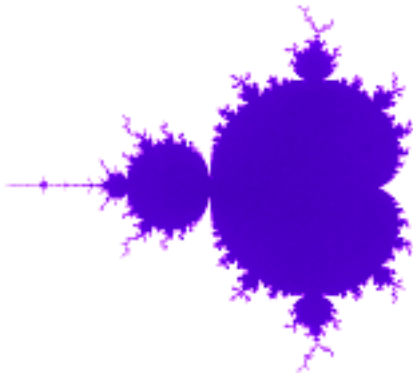
Mes conjectures les plus célèbres sont relatives à l'ensemble de Mandelbrot (voir la figure 2), que j'ai sans doute été le premier à voir, et sans conteste le premier à reconnaître et à examiner, avec le respect, le soin et la prudence que l'image mérite. Reprise des veillées qui avaient donné nos reliefs fractals, utilisation d'instruments bricolés qui marchaient à peine, innombrables clichés fait de taches gris foncé sur fond gris clair, qu'il fallait photocopier, et photocopier encore pour les rendre publiables... Inattendu de constater que la complication extrême, prévue 60 ans plus tôt par Pierre Fatou et Gaston Julia, était visible à l'œil et manipulable à volonté. Ensuite, introduction d'un nouvel ensemble encore

plus compliqué, et inattendu de constater que la répétition de l'examen de ces clichés cristallisait cette complication en régularités jamais vues. Pour finir, j'allais noter plusieurs propriétés évidentes à l'œil, mais qui exigeaient d'être confirmées ou falsifiées. La suite est connue. Une grande conjecture fut démontrée aussitôt, d'autres après cinq ou dix ans seulement. Mais la principale reste à tel point ouverte que même des solutions partielles attirent admiration et enthousiasme (l'idée de l'ensemble en question peut être spécifiée de deux façons, disons, M et N : ce qui semble vrai, mais reste non démontré est que M est identique à N, plus les points limites de N).

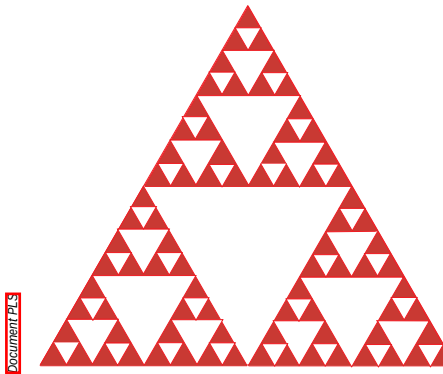
Il était inattendu que, même quand il n'y a rien de «réaliste» dans les images fractales sorties de formules mathématiques toutes simples, ces images soient si largement perçues comme belles, et qu'il en soit de même pour les mélodies fractales.

Les images de la géométrie d'Euclide sont-elles belles ? Je reste de ceux qui le croient très profondément, mais la majorité des humains ne partage pas cet engouement. On lit ainsi, dans un livre écrit et illustre par Georges Rouault, *Cirque de l'étoile filante*, que «l'art suprême n'est pas quantitatif.» Cette opinion, qui n'est pas le fait d'un seul peintre, mérite d'être discutée.

Un tableau de Titien, de Rembrandt, de Picasso ou, même, du tâcheron dont on débite les œuvres dans les grandes surfaces peut-il être représenté quantitativement ? Bien sûr que non, si l'on exclut une description atome par atome, ou une description moins précise, mais suffisante pour produire des copies qui tromperait tous les experts.



2. L'ensemble de Mandelbrot.



3. Un triangle de Sierpinski.

Toutefois il ne s'ensuit nullement que je sois d'accord avec Rouault. Si l'art qu'il pratiquait ne pouvait être quantitatif, il n'est pas exclu que puisse émerger un art quantitatif, algorithmique, qui serait profondément différent du sien. Déjà, on trouve de la beauté aux montagnes et nuages fractals les plus classiques, faits dans un dessein simplement utilitaire, et aux vues, quelque austères qu'on les fasse, de l'ensemble de Mandelbrot. Mais qu'on relève la formule avec un piment de fantaisie, ou même de hasard, et l'on voit surgir toutes sortes d'effets fantastiques, marques de styles bien définis et qu'on aurait cru être nécessairement le fruit de la créativité artistique. Du point de vue de l'artiste, il n'y a là aucune trace de créativité artistique. Mais les émotions de l'amateur d'art ne s'accordent pas nécessairement avec celles de l'artiste. La discussion n'est pas près d'être close.

LE RUGUEUX

Il était inattendu que le même enfant, qui résistait aux parties les plus anciennes et les plus simples des mathématiques, puisse s'enflammer pour des objets géométriques d'une extraordinaire complexité.

Autrefois, on enseignait les mathématiques dans l'ordre où elles avaient été découvertes (puis l'ordre fut inversé, commençant par celles d'aujourd'hui, mais passons). Des maîtres excellents nous signalaient des faits que l'œil comprenait sans peine et déclarait évidents ; ils peinaient pour nous faire accepter que ces évidences restaient à démontrer, mais l'apprentissage fut lent, et gêné par mille exemples d'erreurs de démonstration «impunies,» que nous voyions même dans le travail de nos maîtres.

Voici donc un premier inattendu, qui repose la question de la «bosse des maths.» À la base du désir de prouver, on ne trouve pas tant le désir de mieux comprendre ce qu'on comprenait déjà un peu, mais plutôt le désir de comprendre

au moins un peu ce qui paraissait incompréhensible. Or, quoi de plus incompréhensible, quoi de plus magique (une magie désormais à la portée de tous) que les images fractales telles que celles de l'ensemble de Mandelbrot ? La longue préparation qui m'a poussé à les examiner n'est plus nécessaire aujourd'hui : le désir de les comprendre est devenu spontanément irrésistible pour l'enfant comme pour l'adulte.

Passant à la rigueur, combien il est inattendu qu'une activité presque manuelle, l'écriture de programmes d'ordinateur, ait changé la donne ! Elle nous apporta une métaphore puissante : les programmes qui suivent les règles marchent, les autres ne marchent pas. La machine vous le dit immédiatement (comme il se doit pour que l'apprentissage soit efficace). Il n'y a aucun sens à dire qu'un programme est «presque correct», seulement qu'il s'est révélé, après coup, facile à corriger. Bien sûr, les logiciels sont parfois défaillants, mais cela n'affaiblit pas le message : la différence fondamentale, mais subtile, que les mathématiques font entre le rigoureux et le non-rigoureux trouve une contrepartie «parlante» dans la différence, dont personne ne peut douter, entre les programmes qui marchent parce qu'ils obéissent strictement, sans exception, à toutes les règles, et les autres programmes.

Il était inattendu que ce soit dans l'analyse mathématique dite «fine» d'il y a 100 ans que se soit cachée la clef permettant de quantifier la notion de «rugueux».

En excluant Architas et Eudoxe de son Académie, Platon (selon Plutarque) maintenait «qu'ils corrompaient et gâtaient la dignité et ce qu'il y avait d'excellent en la géométrie... en la faisant descendre aux choses sensibles et matérielles.» Ce sont précisément certaines des «sensations» ainsi chassées qui allaient devenir les sources des sciences, tels la vision, l'ouïe et les sens du lourd, chaud ou sucré. Seul le sens du rugueux gardait une place exiguë et mal quantifiée.

Sans penser désobéir à Platon, des mathématiciens se lassaient de la dérivée, limite de dy/dx , et Hölder la remplaçait par la limite de $\log dy/\log dx$. Plus tard, Hausdorff et Besicovitch concevaient une dimension «anormale», sans aucune finalité concrète. De nombreuses décennies s'étant écoulées, l'inattendu survint quand je sus transmuier l'exposant de Hölder en exposant de rugosité, notion qu'on peut aussi exprimer en termes d'une dimension devenue fractale, et qu'on peut mesurer avec une grande précision. Elle joue pour le rugueux le rôle que la température joue pour le chaud.

Il était entendu que le monde physique est régi par des équations qui présupposent que tout varie de façon «douce». Comment se peut-il donc qu'il regorge de fractales ?

Ce qui était entendu reste vrai, mais il y a en général des singularités, où rien ne va plus. Ma thèse est qu'il est «typique» que ces singularités finissent par former un ensemble fractal. C'est, parmi d'autres exemples de plus en plus nombreux, la base de mon point de vue sur la turbulence et la nature de certaines arborescences fractales nommées DLA (agrégats limités par la diffusion), ainsi que la base de la théorie des interfaces de diffusion de Bernard Sapoval.

Il était inattendu qu'il devienne utile de concevoir le hasard comme tombant dans plusieurs «états» distincts. Le hasard ne sera jamais considéré comme désirable, mais, dans sa forme qu'on peut appeler usuelle, il a été si bien dompté que j'ai pu l'appeler bénin. On croyait même, sans d'ailleurs l'exprimer, que les conditions que cette forme postule sont nécessairement et automatiquement vérifiées dans la nature.

Il était donc inattendu que j'en vienne à constater que les marchés financiers et maints autres phénomènes imprévisibles échappent au hasard bénin. Soit ils ne satisfont pas les conditions requises, soit les conséquences tirées de ces conditions ne se révéleraient que dans des circonstances limites, qu'on ne rencontrera jamais. J'ai conclu qu'il fallait se faire à l'idée que, dans la nature, le hasard peut aussi se rencontrer dans au moins deux autres «états» : sauvage et lent.

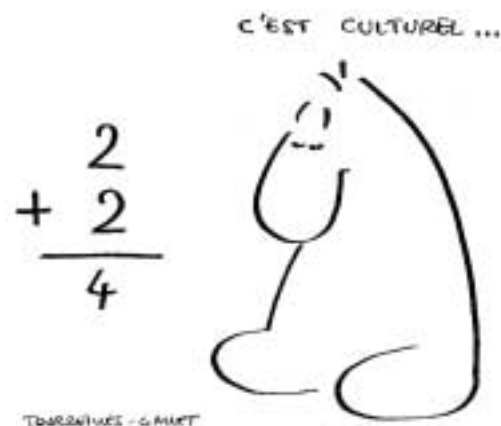
Benoit MANDELBROT est professeur de sciences mathématiques à l'Université Yale et Fellow émérite au Centre de recherches T.J. Watson d'IBM.

Ce texte est une transcription du débat enregistré, avec Émile Noël, au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France Culture le 9 avril 1997, à 9h05.

La mystification d'Alan Sokal

PIERRE THUILLIER

Les penseurs «postmodernes» manquent-ils de rigueur et de culture scientifique? Pour le savoir, un physicien américain a expérimenté.



Il faut dénoncer la paresse et l'imposture intellectuelle, d'où qu'elles viennent.» Telle est la justification qu'a fournie le physicien Alan Sokal, de l'Université de New York, après s'être livré à un brillant canular qui a fait couler beaucoup d'encre. Rappelons les faits.

En mai 1996, la revue américaine *Social Text* a publié un article d'A. Sokal au titre pompeux : «Violier les frontières : vers une herméneutique transformatrice de la gravité quantique.» L'un des objectifs prétendus de ce travail était de remettre en cause les fondements de la science orthodoxe.

Le rationalisme occidental a réussi à imposer un «dogme» : il existe un monde extérieur dont les hommes peuvent progressivement découvrir les lois. Or, affirmait A. Sokal, diverses études révisionnistes, féministes et post-structuralistes ont mis à mal cette croyance, en montrant que la réalité physique est essentiellement «une construction sociale et linguistique». La science moderne n'a donc qu'une «façade d'objectivité» et les privilèges épistémologiques accordés à «la prétendue méthode scientifique» ne sont pas mérités.

Toujours à en croire A. Sokal, il fallait cesser de vénérer le «concept de vérité» et même s'en débarrasser. On pourrait ainsi créer une nouvelle science qui, enfin, serait «postmoderne» et «libératrice». Non seulement on ferait sauter les «barrières artificielles» qui séparent encore les scientifiques du grand public, mais «on purgerait l'enseignement des sciences et des mathématiques de leurs caractéristiques autoritaires et élitistes».

On y introduirait, en revanche, des idées empruntées aux partisans du féminisme, de l'homosexualité, du multiculturalisme et de l'écologisme. Il était bien difficile, concédait A. Sokal, de

prévoir ce qui serait le nouvel «arbre de la science». Dans sa conclusion, il risquait pourtant cette prédiction : la théorie du chaos, puisqu'elle jetait de la lumière «sur le mystérieux phénomène de la non-linéarité, aurait une place centrale dans toutes les mathématiques futures».

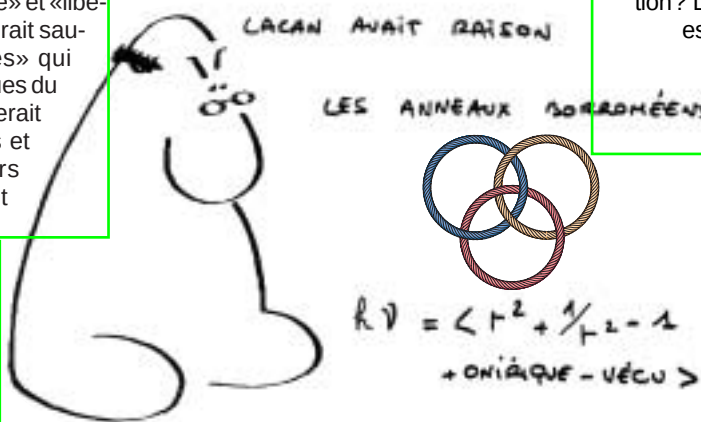
Afin d'étayer ses dires, A. Sokal invoquait, d'une part, la gravité quantique, «cette nouvelle branche de la physique où sont à la fois synthétisées et dépassées la mécanique quantique de Heisenberg et la relativité générale d'Einstein». Il citait, d'autre part, une kyrielle d'intellectuels pratiquant la philosophie, la sociologie des sciences ou les *cultural studies* (une réflexion de type humaniste sur les grands problèmes socio-culturels). Adoptant leur langage, A. Sokal procédait à une vaste «déconstruction» de la pensée scientifique, c'est-à-dire à une remise en question radicale des connaissances les mieux établies. Non sans habileté littéraire, il écrivait par exemple : «Aussi le groupe d'invariance infini-dimensionnel érode-t-il la distinction entre observateur et observé ; le π d'Euclide et le G de Newton, jadis considérés comme constants et universels, sont maintenant perçus dans leur inéluctable historicité.» Ou encore, imper-

turbablement, il proposait ce critère «épistémologique» : «Les quantités ou les objets qui sont en principe inobservables – tels que les points de l'espace-temps, les positions exactes des particules, ou les quarks et les gluons – ne devraient pas être introduits dans la théorie.» Au passage, il signalait l'un des inconvénients de cette innovation : elle excluait de la science «une grande partie de la physique moderne»...

UNE SUPERCHERIE BÉNÉFIQUE?

Ainsi a commencé l'affaire». Car, presque en même temps, A. Sokal faisait paraître dans une autre revue américaine, *Lingua Franca*, un second article révélant qu'il avait composé une parodie, un pastiche. Délibérément, il avait accumulé des énoncés approximatifs, fantaisistes, souvent faux ou même absurdes. Précisant que les nombreuses citations empruntées aux auteurs postmodernes étaient strictement exactes, notre persifleur avouait qu'il avait échafaudé une pseudo-démonstration parfaitement inconsistante. En fait, il s'agissait d'une expérimentation : «Une revue de pointe consacrée aux *Cultural Studies* publierait-elle un article pimenté d'absurdités : a) s'il avait de l'allure, b) s'il flattait les présupposés idéologiques de la rédaction? La réponse, malheureusement, est oui.» En conséquence, on ne pouvait que déplorer «l'arrogance intellectuelle» et le manque de rigueur des théoriciens de la revue.

A. Sokal se demandait notamment pourquoi la rédaction n'avait pas jugé utile de consulter un physicien, ce qui lui aurait permis d'éviter de nombreux pièges. Il avait, par exemple, présenté la théorie des nombres complexes comme «une branche



récente et encore tout à fait conjecturale de la physique mathématique» (les nombres complexes ont été introduits par les algébristes de la Renaissance et Gauss leur donna leur statut de concept mathématique dans les années 1830). Ou encore il avait évoqué «la victoire» remportée par la cybernétique sur la mécanique quantique... Cette victoire, évidemment, est imaginaire. La cybernétique est une discipline spécifique ; en tant que telle, elle ne vise aucunement à supplanter la mécanique quantique. Tout au plus le grand public peut-il la juger plus prestigieuse. Un comité de rédaction attentif n'aurait jamais laissé passer des assertions aussi étranges ; et, même sans l'aide d'experts, il aurait mesuré l'extrême faiblesse de certains arguments. Comment croire, par exemple, que les derniers développements de la mécanique quantique avaient confirmé les spéculations psychanalytiques de Jacques Lacan ?

A. Sokal reconnaît que son expérimentation soulève une question éthique. Les travailleurs intellectuels communiquent dans la confiance et, dans ce cas, il y a tromperie délibérée. Il se justifie, en dernier ressort, en invoquant un motif politique. Affirmant qu'il appartient lui-même à «la gauche», il regrette qu'une certaine gauche américaine trahisse les idéaux progressistes en se ralliant à ce qu'il nomme le «relativisme épistémique». Autrement dit, elle renonce à distinguer le faux du vrai et jette le discrédit sur la science. Ce n'est pas en retombant dans l'obscurantisme, déclare Sokal, qu'on luttera contre le SIDA ou contre le réchauffement de l'atmosphère. Et comment pourrait-on mener une réflexion critique en économie ou en politique si l'on démissionne intellectuellement ?

La revue *Social Text* a eu du mal à se défendre. Dans les médias, du *New York Times* à *Physics Today*, les articles se multiplient autour de cette question : A. Sokal avait-il eu raison de se livrer à une telle mystification ? En France, il fallut attendre plusieurs mois pour que l'affaire Sokal suscite de vives polémiques.

Dans *Le Monde* du 3 janvier 1997, le sociologue Denis Duclos reprocha au physicien américain et à ses acolytes d'être des «pistoleros de l'intellectual correctness» et de se livrer à des «autodafés symboliques» à la fois cyniques et stupides. Dénonçant les «simagrées de M. Sokal», il déplorait, en particulier, son «chauvinisme anti-européen».

Sur ce point précis, comme l'a noté Pierre Guerlain, spécialiste de la civilisation américaine, il est difficile d'être d'accord. Il est vrai que beaucoup de Français sont visés : Jacques Lacan, Jacques Derrida, Gilles Deleuze, Julia Kristeva, Jean-François Lyotard, Bruno Latour, Luce Irigaray et quelques autres. De nombreux auteurs américains, toutefois, sont également mis en cause. Les Français ne sont pas critiqués à cause de leur nationalité, mais parce qu'ils ont utilisé de façon maladroite, erronée ou arbitraire des énoncés scientifiques mal assimilés, et parce qu'ils ont exercé une grande influence sur la «nouvelle gauche» américaine. La vraie cible est constituée par le postmodernisme, c'est-à-dire par un courant de pensée qui, toujours selon A. Sokal, manque totalement de rigueur intellectuelle.

Les experts en sciences humaines ont assurément le droit de se référer aux sciences «dures», mais à condition d'éviter les faux-semblants. Si un psychologue ou un linguiste prétend trouver des arguments «sérieux» dans la topologie, alors il doit s'informer de façon également «sérieuse» sur cette branche des mathématiques.

Pour mener à bien sa critique, A. Sokal a d'ailleurs trouvé un allié européen en Jean Bricmont, professeur de physique théorique à l'Université catholique de Louvain. Ils vont publier ensemble un livre qui devrait s'intituler : Les impostures scientifiques des philosophes (post-)modernes. Leur intention est d'analyser minutieusement divers textes postmodernes afin de mettre au jour des «récupérations» et des «détournements» du théorème de Gödel, de l'hydrodynamique, des relations de Heisenberg et de diverses théories.

RELATIVISME MODERE ET RELATIVISME RADICAL

Si important qu'il soit, ce déblayage ne constitue guère qu'un préliminaire. Le principal problème, selon A. Sokal lui-même, concerne le relativisme affiché par les postmodernes. Sous sa forme extrême, rappelons-le, cette doctrine affirme que toutes les connaissances se valent : la science, malgré ses prétentions, n'est jamais qu'un mode de connaissance parmi d'autres et ne se situe donc pas au-dessus de la magie, de l'astrologie ou de la religion. En d'autres termes, les «théories scientifiques» sont seulement des constructions élaborées à partir de quelques présupposés arbitraires et en fonction de divers intérêts économiques, sociaux, politiques ou culturels. Certains «sociologues des sciences» n'hésitent pas à le dire en termes brutaux : les sciences n'existent pas, il n'y a pas de théories, mais seulement des rapports de forces. En France et aux États-Unis, du moins dans certains milieux intellectuels, les propos de ce genre ont connu une grande vogue. Il faut bien voir ce qui en résulte : la notion même de science est pratiquement vidée de son contenu.

Il est à peine besoin de dire que cette «sociologie» a donné lieu à de multiples discussions. Est-il bien raisonnable, par exemple, de réduire à néant toute l'activité expérimentale des physiciens et des biologistes et de soutenir que le «vrai» et le «faux» doivent s'expliquer de la même façon (c'est-à-dire sociologiquement) ? On peut, comme A. Sokal, en douter. Son opinion n'est cependant pas aussi tranchée qu'on pourrait le croire de prime abord. Pour saisir correctement sa pensée, il est utile de distinguer les formes modérées et les formes radicales que peut revêtir le relativisme.

En effet, bien avant que la nouvelle «sociologie des sciences» ne soit à la mode, de nombreux philosophes et historiens des sciences ont explicitement noté que le fonctionnement de la «méthode expérimentale» était beaucoup plus complexe et beaucoup moins transparent que ne le voulait une certaine tradition. Divers hommes de science ont eux-mêmes expliqué, parfois avec humour, que les purs argu-

UN DINER EN FAMILLE



Surtout, ne parlons pas de l'affaire Dreyfus Sokal!



...Ils en ont parlé...

L'UNIVERS DES SCIENCES

L'UNIVERS DES SCIENCES

LES ÉTOILES

Vie et mort des soleils lointains

ASTROLOGIE

POUR LA
SCIENCE

LES ÉTOILES

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

272 pages - 220 F
code 1892

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p.98

ments rationnels ne suffisent pas à rendre compte du succès des théories. Max Planck, prix Nobel de physique en 1918, écrivait dans son *Autobiographie* : «Une vérité nouvelle en science n'arrive jamais à triompher en convainquant les adversaires et en les amenant à voir la lumière, mais plutôt parce que finalement ces adversaires meurent et qu'une nouvelle génération grandit, à qui cette vérité est familière.»

Même en science, il y a des modes, des pressions sociales, des égarements divers dus à des causes également diverses : publication précipitée de résultats mal confirmés, «oubli» plus ou moins délibéré de certains faits gênants, petites ou grosses tricheries, etc. En outre, il est devenu de plus en plus clair que toute théorisation met en œuvre des choix et des présupposés susceptibles d'être contestés et révisés. C'est ce qu'on peut appeler le relativisme modéré : il met en évidence les limites de la «science», mais se garde de nier radicalement sa spécificité et son efficacité cognitive.

Tout en demeurant vigilant, A. Sokal fait de larges concessions à cette forme de relativisme. Dans un texte postérieur à sa parodie, par exemple, il a déclaré qu'il serait injuste de critiquer indistinctement tous les relativistes. Certains d'entre eux ont assez de bon sens pour reconnaître que certains énoncés empiriques ont une valeur objective ; ils forment à l'égard des théories des critiques dignes de considération. A. Sokal admet également que le scepticisme, à condition d'être «informé», a une fonction positive. Ce qu'il récuse, c'est le relativisme radical. À la fois peu rigoureux et hyper-critiques, les tenants de cette doctrine finissent par dévaluer non seulement les sciences, mais les normes élémentaires du travail intellectuel (rigueur, cohérence, vérification des informations, etc).

Nous sommes ainsi ramenés au projet initial d'A. Sokal : établir «expérimentalement» que tout un secteur de la gauche américaine s'est fourvoyé dans le postmodernisme. Il n'a pas démontré, à proprement parler, que cette dérive était politiquement dangereuse. Autant qu'on puisse juger, il a du moins réussi à dévoiler les faiblesses et même la vacuité d'un certain type de productions intellectuelles. On peut espérer que, des deux côtés de l'Atlantique, les divagations pseudo-scientifiques des postmodernes se feront plus rares. Des questions importantes demeurent toutefois ouvertes ; il serait regrettable que certains propos d'A. Sokal les fassent oublier.

A diverses reprises, il a par exemple affirmé qu'il ne fallait pas mêler les questions épistémologiques et les questions éthiques, les questions factuelles et les

questions relatives aux valeurs. L'idée est certainement juste, du moins si elle signifie qu'on ne doit pas condamner une théorie scientifique sous le seul prétexte qu'elle a été utilisée par l'armée ou par des entreprises capitalistes... A. Sokal ne nie pas pour autant la nécessité de s'interroger sur le fonctionnement social de la science. Au cours de la controverse avec *Social Text*, il l'a dit en toute netteté : «La science et la technologie soulèvent des centaines de questions politiques et économiques importantes. La sociologie des sciences, à son meilleur niveau, a d'ailleurs beaucoup contribué à les clarifier.» Les présupposés philosophiques sur lesquels reposent les diverses disciplines, évidemment, peuvent eux aussi faire l'objet de discussions. Bref, la dénonciation des jongleries intellectuelles n'implique aucunement une démission de l'esprit critique en politique et en philosophie, fût-ce au sujet de la science.

En principe, il ne devrait pas y avoir de malentendu ; mais, concrètement, les remous causés par «l'affaire» n'ont pas toujours favorisé le dialogue et la lucidité. Il faut bien l'avouer : l'«expérimentation» d'A. Sokal se révèle pédagogiquement efficace, mais elle est brutale et risque de causer des blocages. Comme le montrent les réactions de certains représentants des sciences sociales, elle a parfois été ressentie comme une agression et même une humiliation. Ainsi s'explique le réflexe de défense de Denis Duclos : «Ce n'est pas parce qu'une revue de sciences sociales se laisse piéger par des erreurs en physique que les questions sociales cessent d'avoir leur autonomie radicale.»

Plus généralement, la mystification d'A. Sokal a pu faire craindre le retour d'un certain «terrorisme» scientiste : la science, seule détentrice de la vérité, devrait être considérée par tous et en tous les domaines comme l'autorité suprême... Un tel projet, disons-le fermement, ne correspond certainement pas aux intentions d'A. Sokal. Il ne demande pas que la science soit idolâtrée ; il souhaite seulement que les postmodernes renoncent à leur laxisme intellectuel.

Pierre THUILLIER, philosophe et historien des sciences, enseigne à Paris VII.

Pierre THUILLIER, *La revanche des sorcières. L'irrationnel et la pensée scientifique*, Éditions Belin, 1997.

Les articles cités ont été publiés par *Le Monde* des 3, 14 et 18 janvier 1997.

Des informations sur l'affaire Sokal sont disponibles sur le site Web : <http://www.physics.nyu.edu/faculty/sokal/index.html>

Questions de frites

HERVÉ THIS

Les frites de quatrième gamme, ensachées crues, boivent moins l'huile que les frites surgelées.

La quasi-totalité des frites servies dans les restaurants français sortent d'un sachet. À la maison, la frite fraîche résiste, parce qu'elle a des atouts : elle boit moins l'huile. Sera-t-elle détrônée par la frite de quatrième gamme, ensachée crue dans une atmosphère modifiée, qui a été mise au point par Patrick Varoquaux et ses collègues de la station INRA de Montfavet ?

Les modifications des habitudes alimentaires cantonnent la frite maison... à la maison : dans les cantines ou dans les restaurants, la frite en sachets s'impose, parce que les volumes à préparer nécessitent une préparation à l'avance ; or les pommes de terre noircissent quand elles sont laissées à l'air, après la découpe, parce que cette dernière libère des enzymes et leurs substrats, initialement enfermés dans des compartiments séparés des cellules de pomme de terre. En présence d'air, ces molécules réagissent et forment des composés bruns voisins de ceux qui nous font bronzer en été.

Ce brunissement enzymatique avait conduit les fabricants de frites en sachets

à proposer des produits précuits : après pelage et découpe, les bâtonnets de pomme de terre sont d'abord séchés, puis précuits dans un bain d'huile (souvent de l'huile de palme, peu coûteuse), et enfin congelées. Pour la cuisson finale, l'utilisateur peut alors plonger les frites dans un bain de friture, mais les micro-fissures créées lors de la congélation absorbent alors beaucoup d'huile, ou bien les réchauffer au four, mais elles sont alors trop sèches.

Comment éviter ces deux écueils ? Les chercheurs de l'INRA ont étudié l'ensachage sous atmosphère contrôlée de frites crues : ce que l'on nomme les frites de quatrième gamme. Pour obtenir de bons résultats, ils ont traqué les causes de brunissement tout au long de la fabrication. Tout d'abord, les pommes de terre doivent être pelées, si possible sous jet d'eau, par une technique qui évite de trop endommager les cellules. Puis, lors de la découpe des bâtonnets, les lames des couteaux, en acier inoxydable, doivent être aussi affûtées que possibles.

Ensuite les bâtonnets détaillés doivent être maintenus à une température de 4 °C environ, de sorte que le métabolisme des cellules intactes soit aussi ralenti que possible. Après égouttage par centrifugation ou ventilation, les pommes de terre doivent être conditionnées avec un gaz inerte, en l'absence d'oxygène, dans un sachet très imperméable aux gaz. Ainsi les bâtonnets se conservent dix jours à 4 °C sans altération (cependant, au cours du stockage, les tis-

sus de pommes de terre accumulent des sucres qui provoquent un brunissement à la cuisson, par des réactions analogues à celles qui font le brun de la croûte du pain). Le goût et la texture des frites confectionnées ultérieurement ressemblent davantage au goût et à la texture des frites fraîches ; la proportion d'huile est analogue, c'est-à-dire deux fois inférieure à celle de frites obtenues par friture de frites surgelées.

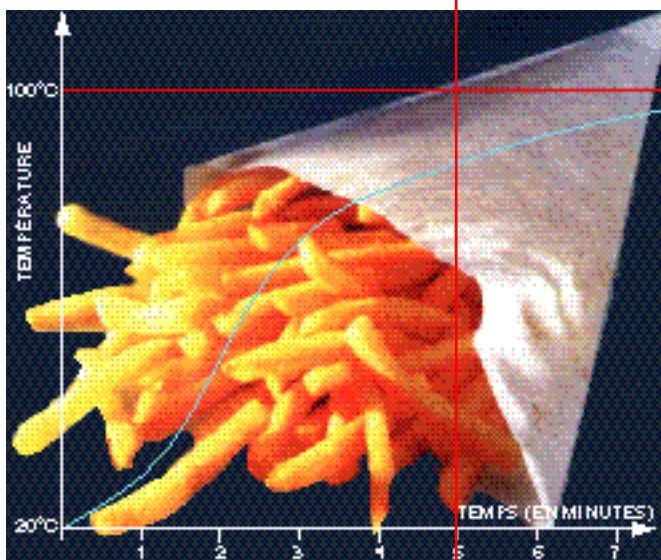
Comment cuire les frites ? Là, les cuisinières et les cuisiniers se mettent à douter, car chaque chef a sa méthode. On se déterminera après s'être demandé ce que l'on attend d'une frite, puis après avoir cherché rationnellement quelles opérations permettent de satisfaire cette attente.

Observons qu'une frite de bon aloi doit certainement être tendre à cœur, aussi peu huileuse que possible et croustillante sans être noire. Observons aussi que la cuisson résulte d'une diffusion de la chaleur, de l'extérieur vers l'intérieur, avec deux phénomènes principaux : la formation de la croûte, et la cuisson du cœur. En effet, les pommes de terre sont composées de cellules qui renferment, notamment, de l'eau et des grains d'amidon : quand la chaleur gagne le cœur des frites par conduction, certaines cellules sont dissociées, tandis que les grains d'amidon libèrent leurs longues molécules dans l'eau chauffée. En surface des frites, la croûte, elle, résulte d'une évaporation complète de l'eau.

L'expérience qui consiste à cuire une frite où l'on a introduit un thermocouple (une sonde qui mesure plus fidèlement et plus rapidement la température qu'un thermomètre) montre que les frites chauffent très lentement : même quand la température de l'huile est de 180 °C, la température au cœur n'atteint 85 °C qu'après plusieurs minutes, car la pomme de terre est thermiquement inerte. Autrement dit, si le premier bain d'huile est trop chaud, la surface noircit avant que l'intérieur soit cuit.

Inversement, le premier bain ne doit pas être trop froid, sans quoi le croustillant ne se forme pas assez rapidement, et la frite boit l'huile. En pratique, sept minutes de cuisson à la température de 180 °C donnent un bon résultat pour des frites de 12 millimètres de côté.

Un second bain parfait alors les frites : dans de l'huile portée à 200 °C, on arrête la cuisson quand la couleur est d'une plaisante blondeur.



La température à l'intérieur d'une frite (courbe bleue) ne tend que lentement vers 100 °C.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 28 avril 1997, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

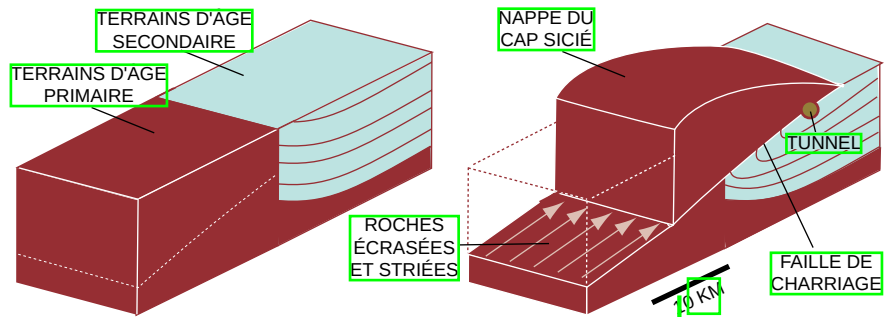
La faille du tunnel de Toulon

L'analyse géologique aurait dû être adaptée au problème posé.

Après chaque catastrophe, un expert prétend qu'il avait mentionné la possibilité du péril, et qu'il n'a pas été écouté. Mais quel est l'expert en experts qui choisit les experts ? Il est des instances où des spécialistes différents des experts choisis n'ont, à tort, pas été consultés. Tel a été le cas, me semble-t-il, de l'évaluation du risque lié au tunnel autoroutier de Toulon.

La construction de ce tunnel de dix mètres de hauteur vient d'être arrêtée à la suite d'un éboulement. Le surcoût associé serait de 600 millions de francs : de difficiles négociations détermineront qui va payer.

Or la structure géologique des environs de Toulon était connue. Son interprétation est délicate, mais elle a été élucidée par un modèle proposé le siècle dernier, et un débat en 1963 à la Société géologique de France a éclairé la question. Pour comprendre cette structure, remontons 40 millions d'années : à cette époque, la plaque ibérique s'est rapprochée de l'Europe en provoquant, par compression, la formation



Charriage de terrains anciens (Nappe du Cap Sicié) sur des terrains plus récents.

de la chaîne des Pyrénées qui se prolongeait à l'époque en Méditerranée et passait au Sud de Toulon. L'écorce terrestre s'est cassée et un compartiment de quelques centaines de kilomètres cubes s'est avancé d'au moins dix kilomètres vers le Nord. Ce phénomène tectonique relativement banal a évidemment eu d'importantes conséquences mécaniques sur les roches le long de la faille de charriage.

Les bouleversements ont été spectaculaires, car ils ont amené des roches schisteuses d'âge primaire (appartenant à la vieille chaîne hercynienne) sur des sédiments d'âge secondaire beaucoup plus jeunes. Ce chevauchement ne se fait pas selon un plan net, mais sur une épaisseur d'une centaine de mètres, elle-même découpée par de nombreuses failles secondaires.

Les propriétés mécaniques des roches ont été modifiées : le matériau est instable, «manque de tenue», d'autant que la composition des terrains est à dominante argileuse et les accidents dans ce type de substrat sont fréquents.

Or le tunnel construit à Toulon traverse la zone de la faille de charriage. Ainsi le responsable de la catastrophe est clairement «la faille de chevauchement de la nappe du Cap Sicié».

L'exemple tragique, mais heureusement en termes financiers seulement, montre que les considérations géotechniques, tout à fait indispensables dans ce type d'ouvrages, doivent être précédées par une étude géologique minutieuse. Dans ce cas extrême, des géologues structuraux spécialisés auraient pu prévoir la grande complexité du sous-sol toulonnais et attirer l'attention des entreprises et du maître d'œuvre sur les difficultés à attendre.

Depuis 20 ans, un «Comité technique des grands barrages» contrôle les étapes de la construction des barrages. Il a montré son efficacité. Je recommanderais bien

volontiers la création d'un comité indépendant de même nature pour les tunnels. En profitant des compétences des géologues.

Le chantier de Toulon est une nouveauté : c'est le premier exemple d'un tunnel à si faible profondeur dans des terrains très perturbés et, de surcroît, sous une ville. C'est un miracle que l'effondrement du tunnel n'ait fait aucune victime. La faille était double : géologique et de raisonnement. Aujourd'hui l'homme réalise des travaux de plus en plus ambitieux, défiant les pièges de la nature. La leçon de Toulon sera retenue.

Maurice MATTAUER



Carotte de sondage dans les gypses du Trias (220 millions d'années) dans la région de Toulon. Ces gypses se trouvent sous des terrains du Permien (250-270 millions d'années), du Carbonifère (290-300 millions d'années) et du Paléozoïque (400-550 Ma).

Bactéries thermophiles

Ces enzymes résistent aux températures et aux pressions élevées.

Des sources hydrothermales sous-marines, dont certaines sont nommées «fumeurs noirs», jaillit une eau dont la température varie entre 100 et 400 °C. Autour de ces fumeurs noirs, les organismes adaptés aux conditions extrêmes abondent. Guy Hervé et son équipe du Laboratoire de biochimie des signaux régulateurs cellulaires et moléculaires étudient les bactéries hyperthermophiles, dont les enzymes résistent aux températures élevées.

Parmi les micro-organismes proches des fumeurs noirs, vivent des archéobactéries, que certains biologistes considèrent comme des bactéries primitives, ancêtres des bactéries actuelles. Au contraire, d'autres pensent que ce sont des bactéries très évoluées, ayant acquis

BRÈVES

Les Amazones

Hérodote mentionne l'existence, au Nord de la mer Noire, d'une tribu de femmes guerrières, les Amazones. L'historien ayant mêlé des récits non vérifiés à des observations personnelles, on doutait de l'existence de ces femmes représentées sur le



Parthénon. Près de la ville russe de Pokrovka, Jeanne Davis-Kimball et ses collègues russes ont trouvé, dans sept tombes de femmes, les objets utilisés par les guerriers : des

pointes de flèches en bronze, de courtes dagues et de longues épées, dont les poignées sont plus petites que celles des armes analogues de la même époque. Toutes les femmes des tribus où vivaient ces Amazones (entre le VI^e et le II^e siècle avant notre ère) n'étaient apparemment pas guerrières : 33 autres tombes ne contenaient que des aiguilles et des billes de verre.

Le béton conducteur

Des scientifiques de l'Institut de recherche pour la construction, à Toronto, ont mis au point un béton conducteur, résistant et de faible coût. Obtenu par injection de matériaux conducteurs de la chaleur et de l'électricité dans le mélange, ce béton permet la diffusion uniforme de chaleur dans une maison ou, utilisé dans le revêtement des routes, évite leur enneigement. Une dalle test, reliée à une source électrique, a été soumise au rigoureux hiver d'Ottawa : elle n'a été recouverte ni de neige, ni de givre.

La molécule anti-graisses

Des souris qui ont un régime très riche en graisses, mais dont le gène *ucp2* est fortement exprimé, ne deviennent pas obèses : les protéines produites par ce gène (isolé par Daniel Riquier et ses collègues) permettent aux souris de brûler les graisses alimentaires au lieu de les accumuler. Cette protéine opère dans les mitochondries, les « usines » cellulaires qui fabriquent les substances énergétiques de l'organisme. La protéine a peut-être la même fonction chez l'homme, ce qui en fait un agent anti-obésité potentiel.

Suite page 24



Les archéobactéries vivent à proximité des sources océaniques chaudes, tel ce fumeur noir.

la capacité de se développer dans des conditions défavorables. Le groupe de G. Hervé s'intéresse surtout à *Pyrococcus abyssi*, une archéobactérie hyperthermophile dont les conditions de croissance favorites sont une température de 96 °C et une pression de 250 atmosphères.

Comme les bactéries « usuelles », les archéobactéries sont pourvues d'enzymes. Les biochimistes ont choisi d'en étudier deux, qui interviennent dans la synthèse des précurseurs des acides nucléiques (l'ADN et l'ARN) : la carbamyl phosphate synthétase et l'aspartate transcarbamylase ; ils les ont comparées aux enzymes homologues de la bactérie *Escherichia coli*. Les enzymes de *Pyrococcus abyssi* sont très stables : elles supportent d'être chauffées à 96 °C pendant trois heures, en conservant 100 pour cent de l'activité pour l'aspartate transcarbamylase ou 50 pour cent pour la carbamyl phosphate synthétase ; dans les mêmes conditions, les enzymes d'*Escherichia coli* sont inactivées en quelques secondes. En outre, les enzymes de *Pyrococcus abyssi* sont aussi efficaces à 96 °C que celles d'*Escherichia coli* à 37 °C.

Les structures et le fonctionnement des enzymes des archéobactéries et de *Escherichia coli* sont-ils comparables ? Les chaînes protéiques ont des compositions semblables. De *Escherichia coli* à l'homme, la carbamyl phosphate synthétase est constituée de deux parties homologues. Ces enzymes résultent de la duplication d'un gène initial dont les deux produits ont été assemblés par une séquence de liaison. Chez *Pyrococcus abyssi*, la protéine homologue correspond à la moitié de la molécule des autres espèces. Il s'agit sans doute d'une enzyme fossile, précurseur des autres

carbamyl phosphate synthétases, codée par un gène qui s'est dupliqué ultérieurement au cours de l'évolution. La duplication de ce gène semble renforcer l'hypothèse stipulant que les archéobactéries seraient les ancêtres des bactéries actuelles.

L'aspartate transcarbamylase est constituée de deux types de chaînes : les unes fixent le substrat sur lequel elles agissent (ce sont les chaînes catalytiques), les autres modulent la réaction enzymatique (ce sont les chaînes régulatrices). L'enzyme de *Pyrococcus abyssi* contient des séquences de ces deux types de chaînes. D'après une modélisation moléculaire, les enzymes auraient des structures similaires, mais celle de *Pyrococcus abyssi* contient deux fois plus d'acides aminés chargés que la protéine homologue de *Escherichia coli*. Ces acides aminés chargés établissent sans doute des ponts ioniques entre les molécules, qui stabilisent l'enzyme à haute température.

La panoplie des archéobactéries disponibles commence à s'étoffer et l'on s'intéresse à une autre bactérie hyperthermophile, *Pyrococcus furiosus*, qui se développe aussi à 96 °C, mais à la pression atmosphérique, ainsi qu'à d'autres bactéries, dites psychrophiles, adaptées au froid et provenant de l'Antarctique. Cette stabilité thermique ouvre de nouvelles perspectives techniques. Deux exemples illustrent l'intérêt de disposer de telles enzymes : dans la méthode d'amplification des gènes, ou PCR, l'enzyme employée doit résister à près de 100 °C (elle est extraite d'une bactérie des sources chaudes) ; les industriels qui fabriquent des lessives recherchent des lipases – des enzymes dégradant les graisses – qui résisteraient aux températures élevées.

Marie-Thérèse LANDOUSY

Stress en bouche

Lorsque nous sommes stressés, la concentration de notre salive en amylase, enzyme qui dégrade l'amidon, augmente. En mesurant cette concentration par la vitesse du changement de couleur d'un réactif coloré, des médecins de l'Université de Chicago suivent l'état de patients à risque de crise cardiaque par exemple. Les prélèvements et l'analyse de la salive sont plus aisés que la mesure dans le sang ou dans les urines des concentrations en adrénaline et en noradrénaline, hormones qui augmentent le rythme cardiaque et la pression sanguine dans les situations de stress.

Du sang dans le tabac

Les biologistes à la recherche d'un sang créé artificiellement et, notamment, de l'hémoglobine qui véhicule l'oxygène dans le sang, ont réussi à faire produire cette molécule par une plante. Des chercheurs de l'INSERM et de la société Limagrain ont construit un assemblage de gènes contenant les deux segments d'ADN codant l'hémoglobine et ont transféré cette information génétique dans des cellules de tabac. Les cellules végétales modifiées ont donné des plants ; les graines et les racines de la moitié de ces plants contenaient de l'hémoglobine humaine fonctionnelle.

L'île des gauchers

Après cinq ans d'enquête, C. Graf, de l'Université de Grenoble, a mesuré que les gauchers sont plus nombreux dans l'hémisphère Sud que dans l'hémisphère Nord. Selon ce naturaliste, l'abondance de gauchers dans l'hémisphère Sud serait due à la force de Coriolis qui a un sens différent dans chaque hémisphère. Les molécules de la vie, qui ont une chiralité (une orientation) particulière, seraient sensibles aux variations de cette force.

Marge agricole

Une exploitation agricole est efficace à 100 pour cent lorsqu'aucune autre ne produit plus avec une quantité d'intrants (travail, terre, semences, engrais...) inférieure ou égale, ni autant avec moins d'intrants. Isabelle Piot-Lepetit, de l'INRA a mesuré que les exploitations céréalières françaises pourraient, en moyenne, gagner sept pour cent d'efficacité par rapport à ce maximum.

Suite page 26

Mini-grenouille

Les petits animaux sont-ils semblables aux grands?

Lors d'un de ses voyages fantastiques, Gulliver découvrit les Lilliputiens, peuple d'humains miniatures. Chez les batraciens, les petites espèces ne sont pas de simples grenouilles lilliputiennes, mais des espèces aux adaptations particulières et très spécialisées.

À Cuba, des zoologistes viennent de découvrir l'une des plus petites grenouilles (*Eleutherodactylus iberia*) qui n'atteint que 10 millimètres à l'âge adulte. Chez une grenouille du Brésil (*Psyllophryne didactyla*), le mâle est encore plus petit avec 8 millimètres de longueur. À Madagascar, *Stumpffia pygmaea* mesure près de 12 millimètres à l'âge adulte, mais seulement 3 millimètres à la métamorphose, ce qui en fait le plus petit vertébré connu, dont le développement est terminé (chez ces amphibiens la taille moyenne est de 5 centimètres).

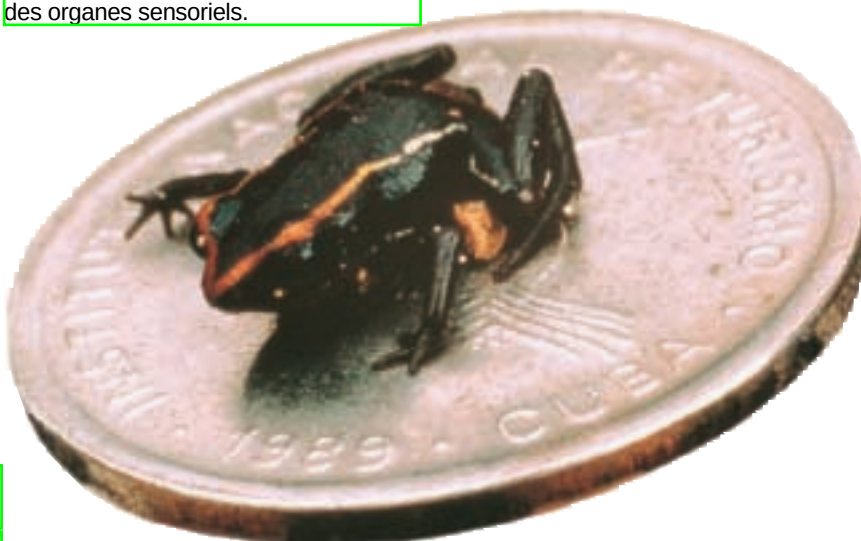
Chez les grenouilles, la réduction de taille n'affecte pas seulement la proportion des organes, mais entraîne aussi des modifications morphologiques, anatomiques, physiologiques et comportementales. *Stumpffia tridactyla*, une autre petite grenouille malgache, n'a qu'un vrai doigt à la main, au lieu des quatre doigts des amphibiens anoures (dépourvus de queue à l'âge adulte), et le nombre de ses orteils est réduit de cinq à trois. Plusieurs os du crâne manquent aux tritons du genre *Thorius*. Beaucoup des petites espèces d'amphibiens manquent de dents. La réduction de taille entraîne aussi une simplification des organes, notamment du cerveau et des organes sensoriels.

Chez les espèces dont le développement passe par le stade larvaire de têtard, les femelles les plus grandes pondent le plus d'œufs. Chez les espèces dont le développement est direct, la phase embryonnaire dépend des réserves contenues dans l'œuf : ce dernier doit donc être grand et, à taille de femelle égale, le nombre d'œufs sera réduit. Cela est confirmé par l'observation : la réduction de la taille corporelle entraîne une augmentation relative de la taille des œufs ainsi qu'une régulation de la fécondité.

Ainsi, l'espèce naine de Cuba *Eleutherodactylus iberia* ne pond qu'un seul œuf et son développement est direct. Ces petites espèces ont en conséquence une activité reproductrice très différente de leurs cousines plus grandes. Chez les *Stumpffia*, le mâle chante, puis le couple construit un nid d'écume pendant l'accouplement pour y pondre environ dix œufs dont sortent des têtards. *Stumpffia* et *Eleutherodactylus* surveillent la ponte, comportement rare chez les amphibiens anoures qui habituellement pondent plusieurs centaines d'œufs, ce qui suffit pour assurer leur descendance, même si de nombreux œufs sont détruits.

Outre la taille physique, on définit une taille biologique qui dépend des composantes génétiques et cellulaires de l'espèce étudiée : à taille physique égale, si deux espèces ont des cellules de tailles différentes, celle avec les cellules de taille supérieure contiendra moins de cellules que l'autre. On dit alors que cette espèce est « biologiquement petite ». L'étude de ces espèces montre les conséquences cellulaires (réduction du nombre de cellules constituant leur cerveau et leurs organes sensoriels) des espèces naines.

Anne-Marie OHLER,
Muséum national d'histoire naturelle



Eleutherodactylus iberia repose sur une pièce cubaine, de la taille d'une pièce de deux francs.

Les mystères de la fécondation

La brebis écossaise, clone de sa mère, soulève d'innombrables questions tant biologiques qu'éthiques.

La brebis Dolly est née d'une mère écossaise et... sans père. Jusqu'où va l'économie ! La reproduction d'un mammifère imposait, croyait-on, la fusion d'un ovule de la mère et d'un spermatozoïde du père. L'équipe de Ian Wilmut, à Édimbourg, a mis à mal ce dogme, puisqu'elle a donné naissance à une brebis en utilisant seulement une cellule différenciée de sa «mère-sœur».

Comment cette équipe a-t-elle pratiqué ? Elle a partiellement reproduit les expériences menées à la fin des années 1970 sur des grenouilles : l'équipe de J. Gurdon avait obtenu des têtards normaux après implantation du noyau d'une cellule somatique dans un œuf dont le matériel génétique avait été détruit par un rayonnement (les cellules somatiques constituent l'ensemble des cellules à l'exception des cellules de la reproduction).

Dans une cellule somatique différenciée, qui contient le génome entier, seuls s'expriment les gènes nécessaires au fonctionnement de cette cellule, les autres gènes étant silencieux (et l'on pensait qu'ils étaient irréversiblement «éteints»). L'expérience de J. Gurdon avait montré que le génome peut être «reprogrammé» pour que tous les gènes soient réactivés, comme dans un œuf fécondé. Ainsi, il y a près de 20 ans, on savait faire des clones de grenouilles à partir de cellules somatiques. Bien sûr, il ne s'agissait pas encore de mammifères.

Puis, il y a quelques années, des biologistes ont obtenu des «clones» de mammifères : on prélevait les cellules d'un embryon au stade de quelques dizaines de cellules et on greffait chacune de ces cellules – parfaitement identiques – sur des œufs non fécondés dont on avait retiré le noyau. Ainsi, tous les animaux issus de cette manipulation avaient le même patrimoine génétique. En fait, il s'agissait de jumeaux multiples

différents de leurs parents, puisqu'au cours de la fécondation qui avait donné le premier embryon, les génomes paternel et maternel s'étaient recombinés.

Dolly est le prolongement de ces expériences. Ici, l'équipe d'Édimbourg a prélevé une cellule somatique de la glande mammaire d'une brebis. La cellule était «quiescente», c'est-à-dire au repos, dans une sorte d'état d'hibernation avec une activité métabolique ralentie. Simultanément, les biologistes ont retiré les chromosomes présents dans un ovule (un œuf non fécondé) et ils ont attendu quelques heures avant d'y injecter la cellule somatique.

La fusion des deux cellules est obtenue par des impulsions électriques qui déstabilisent de façon transitoire et réversible certains constituants des membranes, les phospholipides. Les membranes des deux cellules en contact fusionnent et le noyau de la cellule somatique migre dans l'ovule. Les impulsions électriques ont une autre fonction : elles perméabilisent la membrane, ce qui permet le passage d'une quantité massive d'ions calcium de l'extérieur de la cellule vers l'intérieur. C'est ce signal calcium qui active l'ovule. L'apport d'un noyau contenant un double jeu de chromosomes (on dit aussi un noyau diploïde) dans un ovule, et l'activation

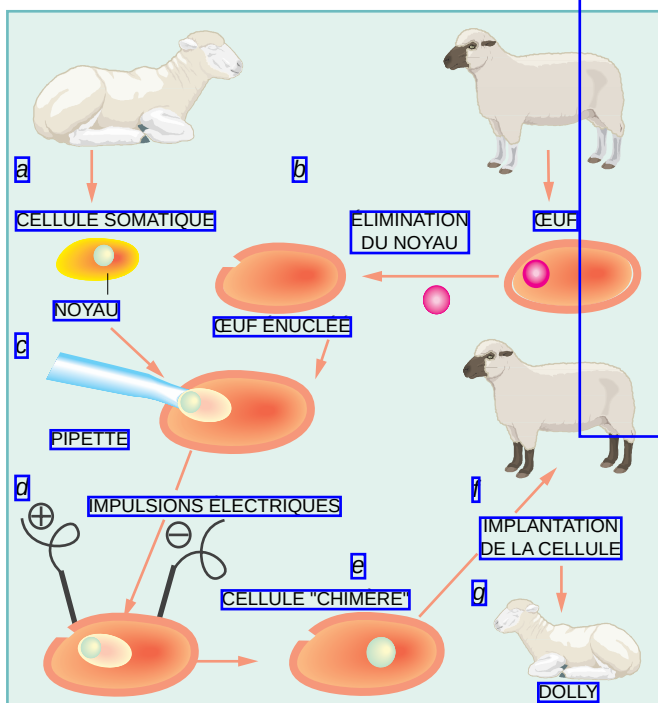
de l'œuf par les ions calcium tendent à reproduire les conditions d'une fécondation «naturelle» (normalement, le spermatozoïde apporte son jeu de chromosomes et favorise la libération massive d'ions calcium).

Plusieurs des tentatives de l'équipe écossaise ont échoué, mais Dolly, fruit de la rencontre improbable d'une cellule somatique et d'un ovocyte, semble se développer normalement. Tous les gènes éteints depuis que la brebis était adulte se sont réveillés et se sont comportés comme dans un œuf fécondé.

Quelles seront les conséquences de cette expérience ? Les questions éthiques soulevées par ce mode de «reproduction» restent ouvertes, et les débats qu'a suscités l'annonce de la naissance de Dolly ont été à la mesure de l'impact social. Sur le plan des connaissances fondamentales, quand les mécanismes d'activation et de reprogrammation d'un génome quiescent auront été précisés, on pourra peut-être déclencher la prolifération de cellules détruites par une maladie, voire par le vieillissement.

Enfin, cette découverte aura des conséquences dans le domaine de l'élevage. Au fil des siècles, l'homme a sélectionné des animaux pour la qualité de leur viande ou pour la quantité de lait produite. Il a croisé des animaux aux performances intéressantes. Cette sélection est favorisée par le brassage des gènes qui a lieu au cours de la reproduction sexuée. Toutefois, quand on a sélectionné un animal performant, des croisements, même entre géniteurs sélectionnés, risquent de faire perdre les qualités recherchées. Au contraire, un clonage tel que l'ont réalisé les Écossais évite le brassage des gènes et garantit que la descendance a strictement le même génome que l'animal dont elle est issue.

Toutefois ce n'est pas parce que deux animaux ont exactement le même patrimoine génétique qu'ils se développent rigoureusement de la même façon, et les performances des animaux clonés n'égaleront pas nécessairement celles de la mère. Cette méthode de reproduction mettra en lumière les effets de l'environnement, des conditions d'élevage et de l'alimentation. Si elle n'interdit pas une certaine variabilité, elle menacerait, en revanche, la biodiversité des espèces ainsi clonées.



DOLLY a été conçue de la façon illustrée ci-dessus : une cellule somatique (une cellule de la glande mammaire) a été prélevée sur la «mère» (a). Simultanément, on a retiré le noyau d'un œuf provenant d'une autre brebis (b). La cellule somatique a été introduite dans l'œuf enucléé (c) et les membranes des deux cellules ont été fusionnées par des impulsions électriques (d), lesquelles ont également déclenché l'expression du génome de la cellule somatique et de l'embryogenèse. La cellule «chimère» ainsi obtenue (e) a été implantée sur une brebis «porteuse» (f). Dolly est le fruit de cette manipulation (g).

Grossesses gémellaires

Selon Philippe Lazar, de l'INSERM U155, un facteur inhiberait la maturation des follicules qui, chaque mois, libèrent un ovule fécondable chez la femme. Ce facteur serait produit par les follicules eux-mêmes : plus ils sont nombreux dans l'ovaire, plus la concentration en ce facteur serait élevée. Inversement, à mesure que le nombre de follicules diminue, c'est-à-dire plus la femme vieillit, plus la concentration en facteur inhibiteur diminuerait. C'est peut-être pourquoi le nombre de grossesses gémellaires augmente avec l'âge de la future mère.

Les noms des éléments

Ça y est ! Après des années de controverses, les éléments chimiques de numéro atomique 104 à 109 ont été nommés respectivement rutherfordium, dubnium, seaborgium, bohrium, hassium et meitnerium. Généralement le découvreur d'un élément a le droit de le nommer à sa guise, mais en 1994, un comité de l'Union internationale de la chimie pure et appliquée (IUPAC) avait refusé que l'élément 106 soit nommé d'après Glenn Seaborg, parce qu'il vivait encore. Le comité a changé ses règles.

L'eau des nuages... interstellaires

À l'anneau de stockage d'ions lourds, à l'Université d'Aarhus, au Danemark, des physiciens danois et israéliens ont simulé les conditions physico-chimiques des nébuleuses interstellaires et observé que de l'eau se formait dans une réaction entre l'ion hydronium (H_3O^+) et un électron isolé. Cette expérience indique qu'un système de refroidissement à eau refroidit les nuages d'hydrogène qui s'échauffent lors de leur contraction. Ce refroidissement prévient la dilatation des nuages qui continuent à se contracter : les étoiles peuvent se former.

Vieilles lances

La découverte de trois lances en bois, taillées il y a 400 000 ans dans des troncs d'épicéa, prouve que les *Homo erectus* chassaient de gros animaux. Ces armes étaient probablement lancées : comme un javelot actuel, chaque lance a un diamètre maximal au tiers de sa longueur, en partant de la pointe, et elle est effilée vers la hampe. En outre, les chasseurs connaissaient bien leur matériau : la pointe est taillée dans la partie la plus dure du bois, la base du tronc.

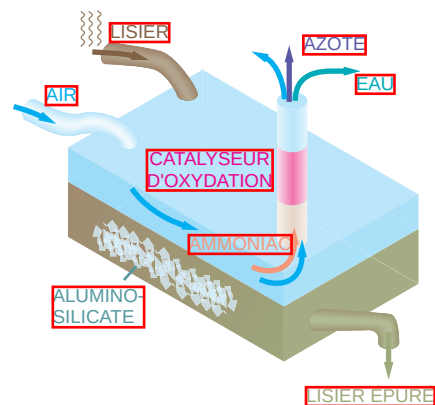
De l'essence au lisier

On dépollue le lisier comme le pétrole.

Les éleveurs de porcs ont des points communs avec les raffineurs : des rejets polluants et odorants. Ils peuvent résoudre ces inconvénients avec les mêmes techniques. L'institut français du pétrole a appliqué des traitements des hydrocarbures à l'épuration du lisier.

Le lisier, les déjections des porcs, est utilisé comme engrais par les agriculteurs. Il a toutefois deux défauts. Le plus perceptible est sa mauvaise odeur, qui indispose les riverains. Le second est sa forte concentration en ammoniac, qui se dégrade dans le sol en nitrates. Ceux-ci polluent les cours d'eau et les nappes phréatiques : l'épandage doit être limité dans le temps et dans l'espace.

Les molécules odorantes du lisier sont des mercaptans, composés soufrés volatils, que l'on trouve aussi mélangés aux hydrocarbures du pétrole. Leur oxydation dans une cuve en présence d'air et d'un catalyseur minéral produit des molécules disulfurées, plus lourdes. La tension de vapeur de ces dernières est plus faible, et leur seuil de perception olfactif est supérieur. Elles restent dans la phase liquide et ne répandent pas d'effluves nauséabonds. L'oxydation des mercaptans est catalysée par un alu-



Le lisier est épuré grâce à des réactions d'oxydation avec l'oxygène de l'air. Dans le lisier liquide, des alumino-silicates catalysent la transformation des composés soufrés odorants en molécules plus lourdes. L'ammoniac contenu dans le lisier est entraîné par le courant d'air et oxydé dans un pot catalytique.

mino-silicate de sodium, analogue au «bleu» que les lavandières ajoutaient autrefois à leur lessive.

Quant à l'ammoniac, un courant d'air qui circule dans la cuve l'entraîne. Le mélange est chauffé et passe dans un dispositif analogue à un pot d'échappement catalytique : le catalyseur est un métal précieux, finement divisé, porté par une matrice minérale. L'ammoniac et l'oxygène se combinent, formant de l'azote et de l'eau. La réaction ayant lieu à basse température, elle produit peu d'oxydes d'azote.

À la fin de 1996, huit unités de traitement avaient été installées en Bretagne, région d'élevage de porcs. On prévoit 51 réacteurs en 1997 et 280 en 1998.

Points chauds

Une nouvelle façon de localiser les sources de chaleur souterraines.

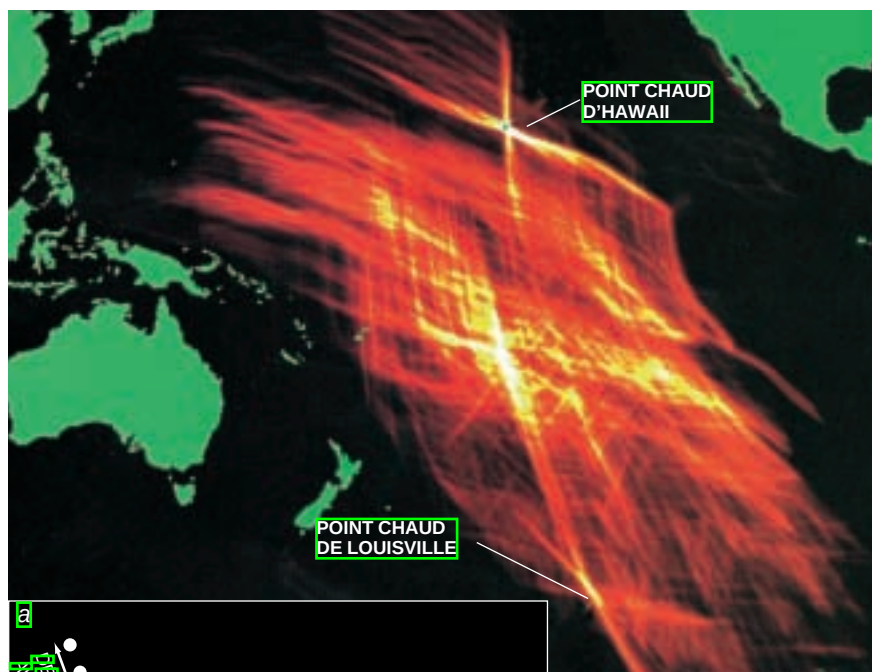
Telles des torchères immobiles sous les plaques tectoniques en mouvement, les points chauds géologiques – des concentrations de chaleur dans le manteau terrestre – percent des trous dans ces plaques. Le magma sous-jacent s'échappe par ces trous et forme des volcans alignés dans la direction du déplacement de la plaque. Les géologues cherchent à identifier ces empreintes volcaniques et à localiser les points chauds qui leur sont associés. Une nouvelle méthode facile et précise donne la position de ces points chauds.

Jusqu'à présent, les géologues devaient déterminer l'âge des différents volcans associés à un point chaud pour

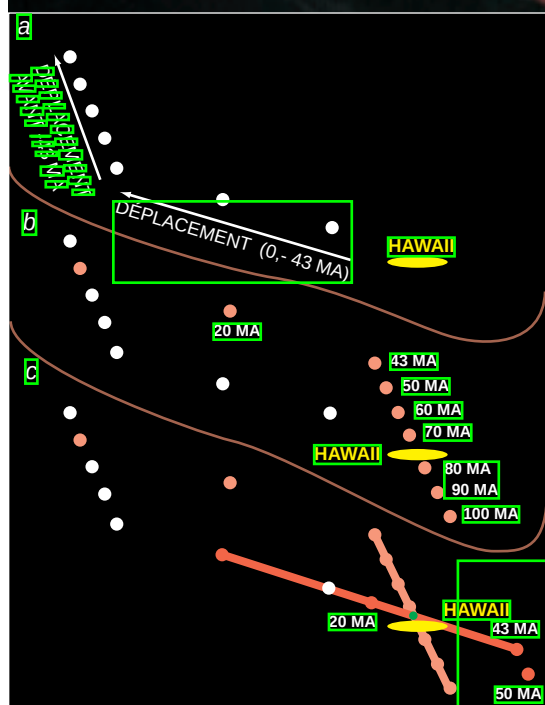
le localiser. Connaissant aussi les mouvements passés de la plaque tectonique, ils en déduisaient la position du point chaud. Toutefois, on connaît mal les mouvements des plaques océaniques, car on estime difficilement l'âge des volcans sous-marins éteints. Aussi cette méthode est-elle imprécise.

Paul Wessel et Lauren Kroenke, de l'Université d'Hawaii, voulaient pourtant utiliser cette méthode classique pour localiser les points chauds sous-marins. Par suite d'une erreur dans la programmation de leur ordinateur, ils avaient obtenu une ligne différente de celle qu'ils prévoyaient. Ils comprirent qu'ils n'avaient pas obtenu la position du volcan étudié au cours du temps, mais toutes les positions possibles du point chaud associé.

Sans connaître l'âge du volcan, P. Wessel ne pouvait savoir où se trouve réellement le point chaud le long de ce tracé. Il a alors remarqué que les tracés d'autres volcans se croisent en un point. En appliquant cette méthode aux îles et



P. M. WESS



Sur cette simulation, les points chauds d'Hawaii et de Louisville sont localisés à l'intersection des lignes qui dessinent des X.

mouvement des plaques du Pacifique : les géophysiciens l'ont systématiquement appliquée à tous les volcans du Pacifique cartographiés par satellite. Ils ont constaté que les chaînes volcaniques peu élevées donnent des intersections floues, ce qui indiquerait, peut-être, que les points chauds sous-jacents bougent.

Le résultat le plus étonnant fut de trouver que le X qui marque le point chaud de Louisville est situé 400 kilomètres plus au Sud que ne le supposaient les géophysiciens. Curieusement, il y a quelques années, en Polynésie française, on avait détecté des secousses sismiques en provenance de cette position, sans savoir comment les interpréter. Louis Géli, de l'IFREMER, étudia le site jusqu'à l'année dernière et y découvrit du matériau volcanique très récent. Tout semble indiquer qu'il s'agit du point chaud de Louisville.

Cette nouvelle méthode, qui donne la position des points chauds avec une précision inégalée, sans qu'il soit besoin de connaître l'âge des volcans sous-marins, intéresse beaucoup les géophysiciens. Certaines erreurs de programmation sont bénéfiques!

David Schneider

Détermination de l'emplacement du point chaud qui a créé la chaîne hawaïenne. Les volcans sont alignés sur deux segments (a) correspondant aux déplacements de la plaque Pacifique au-dessus du point chaud, la direction de ce déplacement ayant changé il y a 43 millions d'années. Sans connaître l'âge d'un volcan (b), on retrace ses positions passées, ce qui correspond à déterminer le lieu géométrique de la position du point chaud qui peut avoir créé ce volcan. En retraçant les positions d'un volcan plus jeune (c), on détermine l'emplacement exact du point chaud unique ayant engendré ces deux volcans (le point vert).

aux volcans sous-marins associés au point chaud d'Hawaii, le géophysicien a fait apparaître un grand X sur sa carte, à l'endroit même du volcan le plus actif de cette région.

Cette méthode ne semblait pas miraculeuse : quiconque vivant sur l'île principale de l'archipel d'Hawaii sait qu'un point chaud est localisé en dessous. Toutefois la méthode sert aussi à retracer le

Nager pour vivre

L'auto-apprentissage de la natation par les tortues luth.

Les tortues luth sont de remarquables nageuses. Leurs palettes natatoires antérieures leur permettent de se déplacer rapidement et de changer facilement de direction. La coordination des mouvements nécessaire à la nage n'est toutefois pas innée : les nouveau-nés apprennent à nager, par eux-mêmes et rapidement.

Les œufs des tortues luth éclosent sur la plage, à plusieurs dizaines de mètres de la mer. La première activité des nouveau-nés est donc de ramper dans le sable. Après cette phase de locomotion terrestre, ceux qui atteignent l'eau découvrent un nouvel environnement et ses contraintes : absence de support ferme sous le corps, densité, salinité, viscosité, pression et température de l'eau, courants et impacts déstabilisants des vagues. Ils découvrent aussi des limites de leurs capacités physiologiques, tel leur mode de respiration pulmonaire qui les oblige à expirer et à inspirer à la surface de l'eau.

Comment les tortues nouveau-nés se comportent-elles lors de ce premier contact aquatique ? Nous avons introduit des tortues luth, juste après leur sortie de l'œuf, dans un aquarium profond et nous les avons filmées jusqu'à leur première prise d'air. Après une chute vers le fond au cours de laquelle les membres ne jouent aucun rôle, les animaux essaient de remonter.

Les premières tentatives sont infructueuses : les mouvements des membres antérieurs et postérieurs ne sont pas synchronisés. Un ralentissement de ces mouvements se traduit par une trop grande durée des phases d'abaissement ou d'élévation. La trop faible amplitude de ces phases et un mauvais contrôle de l'inclinaison du corps entraînent les tortues vers le fond.

Après deux minutes en moyenne, la plupart des tortues réussissent toutefois à s'élever doucement vers la surface pour effectuer leur première respiration. La réussite de l'entreprise nécessite la maîtrise des mouvements des différentes parties du corps. La tortue crée des angles d'attaque efficaces des palettes natatoires en inclinant son corps et en ajustant la trajectoire de ces palettes, et déplace ses membres simultanément. L'abais-



Après des tentatives infructueuses (à gauche), une tortue luth nouveau-né plongée dans un aquarium parvient à remonter en surface (à droite). Elle doit pour cela mouvoir ses membres antérieurs simultanément, ajuster leur trajectoire, synchroniser ses membres postérieurs et maîtriser l'inclinaison de son corps.

sement synchronisé des membres antérieurs produit une force de propulsion tandis que leur élévation crée une composante de freinage. Le battement synchronisé vers l'arrière des membres postérieurs est faiblement propulsif tandis que leur battement vers l'avant donne aussi une composante de freinage. L'association des phases opposées de chaque type de membres, abaissement des antérieurs et battement vers l'arrière des postérieurs par exemple, ajuste progressivement la force de propulsion.

Dès que les nouveau-nés ont respiré pour la première fois en surface, ils

savent définitivement nager. Leurs membres antérieurs interviennent simultanément et jouent le rôle majeur dans la propulsion aquatique. Les petites tortues contrôlent l'orientation de leurs membres et l'inclinaison de leur corps qui règlent les angles d'attaque : elles savent s'élever ou descendre dans l'eau. Elles maîtrisent enfin la complémentarité mécanique apportée par les mouvements synchrones des membres postérieurs, utilisés dans la nage lente horizontale.

S. RENOUS, URA 1137 CNRS, MNHN et V. BELS, CARAH

Les haies et les bosquets

On démontre leur intérêt agricole et écologique.

Les haies et les bosquets disparaissent : l'enquête qui recense, tous les 15 ans, l'utilisation du sol dans chaque département montre que plus de 60 pour cent d'entre eux ont été supprimés depuis les années 1960. Pourtant les haies protègent les cultures et les animaux d'élevage contre le vent ou contre l'érosion, elles épurent l'eau de ruissellement et elles abritent la faune sauvage.

Jadis, la haie était un moyen de clore une propriété, mais aussi d'obtenir du bois de chauffage, de protéger le bétail, de briser le vent ou d'éviter les regards indiscrets. Le souci d'exploitation maximale des terres conduisit à leur élimination, mais la nouvelle politique agricole des années 1990 renforce des actions incitatives que les conseils généraux avaient commencées dès les années 1980, pour préserver l'identité et l'attrait du paysage local, notamment aux bords des routes, dans les zones touristiques, ou à proximité des zones d'habitation ; enfin les agences de l'eau s'intéressent à leur effet sur la qualité des eaux.

Comment refaire les haies détruites ? Quelles essences planter ? Comment

les entretenir ? Et comment quantifier leur intérêt ? Depuis 1975, l'Institut pour le développement forestier analyse ces questions et détermine des pratiques rationnelles de la réimplantation des haies. Thomas Schmutz et ses collègues de huit instituts agricoles ont commencé par évaluer les coûts de création et d'entretien : les haies plantées, il faut se préoccuper des clôtures, talus ou fossés attenants, et récolter le bois, soit par émondage, soit par coupe rase. Le temps total d'entretien atteint quatre semaines par an (ce qui fait de l'entretien des haies un chantier important), mais le bois de chauffage produit rémunère une partie de ce travail.

Les avantages, maintenant. Tout d'abord, les bovins observés dans le Limousin recherchent l'ombre lorsque le temps est chaud, et ils se protègent du vent et de la pluie ; les haies atténuent les stress de la mise au champ des veaux. Les brebis craignent le rayonnement solaire ; en l'absence de haies, elles sont agitées, moins actives au lever du jour, et, par temps chaud, alternent des temps de repos allongés avec des temps de repas raccourcis, ce qui diminue l'efficacité de la rumination.

D'autre part, les haies protègent les cultures du vent : un brise-vent bien étudié réduit la vitesse du vent de 50 à 75 pour cent, dans une bande de 100 à 200 mètres derrière la haie : la hauteur du maïs ainsi protégé en plaine de Valence atteignait 40 à 50 centimètres de plus que le maïs exposé, et sa floraison était avancée, ce qui réduisait la nécessité des arrosages de fin de saison et augmentait le rendement de dix quintaux par hectare, en moyenne sur deux ans.

Enfin, dans le sol aussi, la haie exerce son influence bénéfique, en épurant l'eau sur une bande de cinq à dix mètres de large : les bandes non cultivées captent ou éliminent une grosse partie des nitrates, phosphates et pesticides. Les haies, et leur voisinage, contribueraient à l'épuration par trois mécanismes : leur enracinement aiderait à stocker une partie de ces composés dans le sol ; les végétaux eux-mêmes capteraient une partie des composés, stockant certains d'entre eux et émettant le reste dans l'atmosphère ; et, surtout, les observations réalisées en Bretagne laissent penser que les haies créent des conditions favorables pour que les micro-organismes du sol épurent l'azote, avant de le renvoyer dans l'atmosphère.

Les haies sont-elles une source d'insectes ravageurs des cultures ? L'abri que donnent les haies aux mammifères et aux oiseaux sauvages le faisait craindre, mais l'étude systématique et prolongée des insectes permet d'affirmer que la haie n'augmente pas les risques d'attaque par des insectes ravageurs inféodés aux haies. Par prudence, les entomologistes



Haie brise-vent au milieu d'un champ de maïs, dans la plaine de Valence.

recommandent d'éviter certaines essences, par exemple le baguenaudier, dans une haie qui jouxte un verger de pommiers, parce que l'on favoriserait alors la prolifération des zeyzères, un gros ver qui détruit les rameaux. De même, on évitera le buis à côté des arbres à noyaux (pêchers, cerisiers, abricotiers), car il semble attirer les pince-oreilles (forficules). Inversement, de nombreuses essences apportent surtout des insectes utiles aux vergers : ce sont des arbustes tels que noisetiers, charmes, lauriers-tins, cornouillers, ou bien des arbres tels que micocouliers ou chênes pédonculés.

Un réseau quantique

Durant la guerre froide, le «téléphone rouge», qui reliait Moscou à Washington, était protégé par un système de chiffrement absolument sûr. Malheureusement, ce système nécessitait l'échange préalable, avant chaque communication, d'une clé de chiffrement à usage unique. Cet échange nécessite un courrier fiable. Au laboratoire de *British Telecom*, Paul Townsend a mis au point un système de communication chiffré multi-utilisateurs, fondé sur la mécanique quantique. Cette méthode permet à plusieurs utilisateurs d'échanger en toute sécurité des clés de chiffrement.

Aujourd'hui, les canaux de télécommunication reposent sur le déplacement d'ondes électromagnétiques. Un espion qui souhaite «écouter» une communication peut aisément le faire. Certes, il ne suffit pas d'écouter pour comprendre. Encore faut-il que l'espion déchiffre le message. Les méthodes classiques de chiffrement utilisent une clé publique (un grand nombre) que l'espion devra factoriser pour déchiffrer le message. S'il est vrai que les moyens de calculs actuels ne permettent pas cette factorisation en des temps raisonnables, on ne peut prédire ce que seront ces moyens dans dix ans, alors même que les données chiffrées aujourd'hui seront encore en circulation. Pour que la sécurité soit totale, une clé à usage unique, aussi longue que le message, doit être utilisée.

La cryptographie quantique fournit la solution rêvée : un moyen parfaitement sûr d'échanger des clés, sans possibilité d'écoute discrète. Cette méthode est fondée sur la mécanique quantique. Cette dernière stipule qu'il est impossible de mesurer parfaitement l'état d'une particule, telle la polarisation d'un photon. De plus, ces mesures perturbent l'état des particules. On transmet une information en la codant sur des photons individuellement polarisés au travers d'un canal quantique. L'espion ne peut écouter la transmission sans mesurer l'état des photons, ce qui introduit des erreurs dans la trans-

mission. Le récepteur légitime du message détecte alors qu'il y a eu écoute.

Malheureusement, le récepteur ne peut pas non plus mesurer l'état des photons de manière exacte, mais ces problèmes se résolvent par des techniques «classiques» mises au point par les fondateurs de la cryptographie quantique, Charles Bennett et Gilles Brassard. Un tel procédé permet ainsi à deux personnes de constituer à distance une clé secrète arbitrairement longue, et de manière sécurisée. Après cet échange, les interlocuteurs utilisent la clé pour échanger des messages de manière parfaitement sûre en utilisant un chiffrement classique.

Le procédé d'échange de clés par un canal quantique doit surmonter plusieurs obstacles technologiques, notamment l'élaboration du canal.

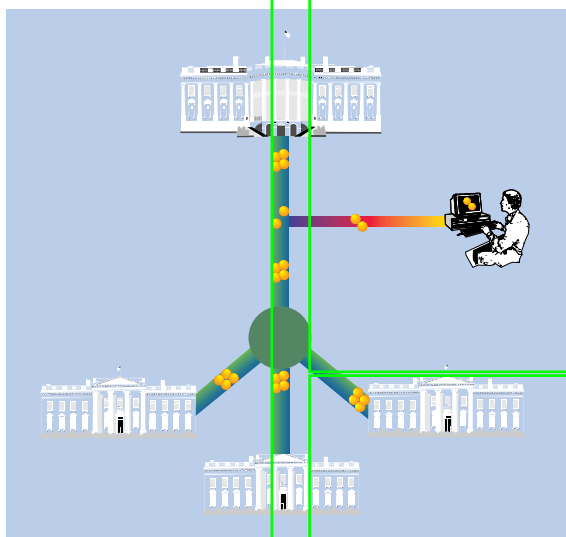
Par la nature même du procédé, il est en effet impossible d'amplifier le signal par un procédé actif, ce qui limite la portée de telles communications. La première expérimentation d'un canal quantique a été réalisée en 1989 sur une distance de 32 centimètres dans les laboratoires d'IBM. En 1995, au CERN, un canal quantique de 23 kilomètres, composé de fibres optiques, a été testé sous le lac de Genève.

Ces procédés ne permettaient que les communications entre deux personnes. Au laboratoire de recherche de *British Telecom*, Paul Townsend a mis au point un «réseau optique quantique» : un réseau qui permet à un émetteur d'échanger des clés secrètes avec trois récepteurs différents sur plus de cinq kilomètres. Un tel

réseau pourrait, par exemple, permettre à l'Élysée de communiquer de manière parfaitement sécurisée avec ses différents ministères.

D'autres expériences tentent d'utiliser la cryptographie quantique pour changer les clés de chiffrement de satellites de communication en orbite basse. Malheureusement, la portée de ces transmissions quantiques est trop faible...

Serge VAUDENAY, CNRS, ENS, Paris



La cryptographie quantique peut être utilisée pour échanger des clés de chiffrement confidentielles entre l'Élysée et des ministères reliés par fibre optique. Un espion qui écouterait cet échange altérerait le signal et serait aussitôt repéré.

Les oscillations de Bloch

Soumis à une force constante, des atomes oscillent dans un réseau de lumière.

En 1929, Félix Bloch et Clarence Zener prédisent qu'une tension constante appliquée aux bornes d'un cristal parfait donne naissance à un courant alternatif, dû à un mouvement oscillatoire des électrons, dénommé oscillations de Bloch. Cette prédiction contredit la loi d'Ohm selon laquelle on devrait voir apparaître un courant continu. Ce phénomène est d'observation difficile car dans les cristaux réels les chocs très fréquents entre les électrons et les défauts cristallins font qu'un courant continu s'établit. Pour observer ces oscillations en 1993, il a fallu fabriquer des cristaux artificiels, nommés super-réseaux. Cet effet vient d'être observé dans un système physique très différent : à l'École Normale Supérieure, Christophe Salomon et ses collègues ont mis en évidence des oscillations de Bloch d'atomes dans un réseau de lumière.

Ce réseau est créé par l'interférence de deux lasers se faisant face. La longueur de maille du réseau (la distance entre deux ventres d'interférence, par exemple) est égale à la moitié de la longueur d'onde des faisceaux laser, soit 0,425 micromètre. Cette longueur est 4 000 fois plus grande que le pas d'un réseau cristallin. Dans ce réseau de lumière, les atomes jouent le rôle des électrons dans le cristal.

Les oscillations de Bloch sont la manifestation d'un effet quantique : les atomes sont délocalisés sur plusieurs sites du réseau car leur longueur d'onde associée est supérieure à la maille du réseau. Par effet tunnel, les atomes passent d'un site du réseau à l'autre. L'effet d'une force uniforme est de faire osciller les atomes, avec une période proportionnelle à la constante de Planck et inversement proportionnelle à l'intensité de la force et à la longueur de maille du réseau.

De manière à observer les oscillations, on refroidit les atomes car, selon

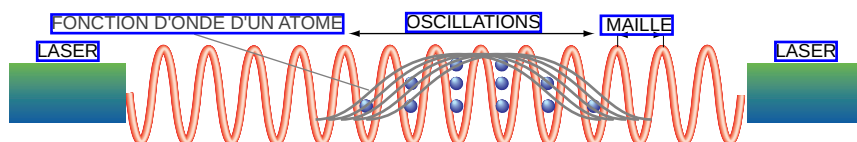
la relation d'Heisenberg, plus les atomes sont lents (donc froids), plus l'extension spatiale de leur fonction d'onde est importante et plus ils sont délocalisés.

Dans l'expérience de l'École Normale, des atomes de césium sont d'abord refroidis et piégés par laser. Selon la technique du piège magnéto-optique, mettant en œuvre six faisceaux laser et un champ magnétique non homogène, on refroidit et on piège les atomes dans les trois directions de l'espace, jusqu'à une température de cinq microkelvins.

Ensuite on refroidit encore bien plus les atomes, selon une seule direction de l'espace cette fois, jusqu'à une température de trois nanokelvins. Puis, par une sélection en vitesse supplémentaire, la vitesse moyenne des atomes selon cette direction est encore diminuée : les atomes sont alors délocalisés sur une distance de quatre micromètres.

On branche enfin les faisceaux laser qui créent le potentiel lumineux périodique. Dès lors, comment appliquer aux atomes une force constante, qui jouerait le rôle de la force électrostatique dans le cristal ? On pourrait les laisser tomber mais la gravité est difficilement contrôlable. On introduit un décalage de fréquence augmentant linéairement avec le temps entre les deux faisceaux laser qui constituent le réseau lumineux, de sorte que, dans le référentiel du laboratoire, le potentiel périodique n'est plus stationnaire et défile avec une accélération constante. Dans un référentiel lié au potentiel lumineux, les atomes sont alors soumis à la force constante résultant du potentiel lumineux, plus une force d'inertie ajustable.

Pour mettre en évidence les oscillations, on éteint brusquement les faisceaux laser qui créent le potentiel. On mesure ainsi la distribution de vitesse des atomes juste avant la coupure. Les physiciens observent alors que les atomes oscillent, conformément aux prédictions de Bloch et de Zener. Selon l'état initial des atomes de césium dans le réseau de lumière, l'amplitude totale des oscillations est de 4,8 micromètres ou de 9,4 micromètres, soit 10 ou 20 mailles du réseau de lumière créé par les faisceaux laser. La période des oscillations est égale à huit millisecondes, dix milliards de fois supérieure à la période des électrons dans un réseau cristallin.



Dans un potentiel périodique, des atomes de césium ultrafroids soumis à une force extérieure uniforme effectuent des oscillations de Bloch par effet tunnel sur une dizaine de sites.

L'expérimentation animale : utilité et éthique

ANDREW ROWAN

Les expériences menées sur les animaux sont au cœur de la recherche biomédicale. Quel est leur coût ? Quel est leur intérêt ?

Depuis une vingtaine d'années, le débat sur l'utilisation d'animaux en recherche est passionné, mais stérile. Il est alimenté par des photographies qui émeuvent le public et par des prises de position simplistes, dont nous ne devons pas nous contenter. Des attaques vigoureuses et des appels à la pitié sont incontestablement des moyens de toucher le grand public, mais ne vaut-il pas mieux analyser sans passion des faits correctement établis ?

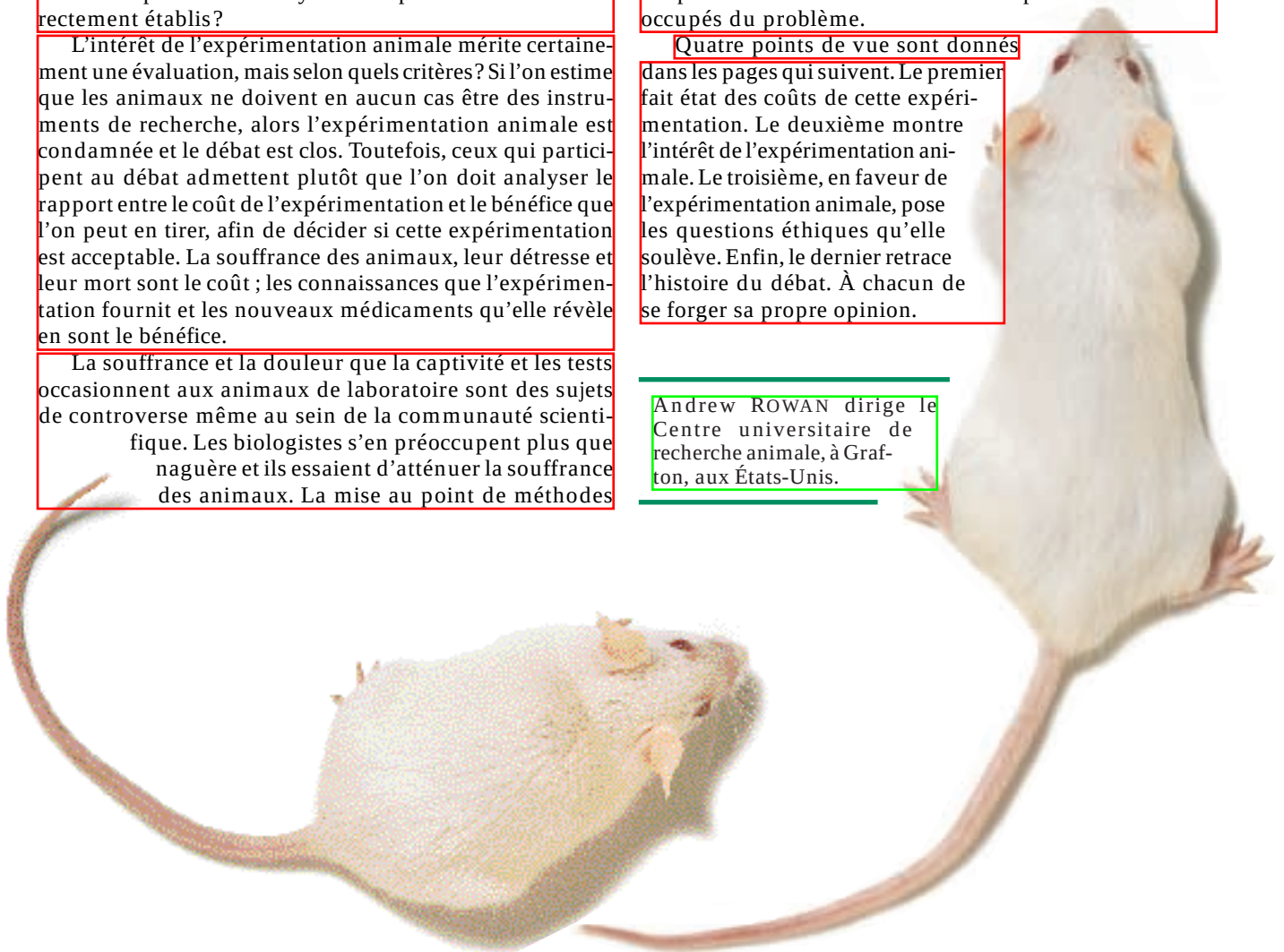
L'intérêt de l'expérimentation animale mérite certainement une évaluation, mais selon quels critères ? Si l'on estime que les animaux ne doivent en aucun cas être des instruments de recherche, alors l'expérimentation animale est condamnée et le débat est clos. Toutefois, ceux qui participent au débat admettent plutôt que l'on doit analyser le rapport entre le coût de l'expérimentation et le bénéfice que l'on peut en tirer, afin de décider si cette expérimentation est acceptable. La souffrance des animaux, leur détresse et leur mort sont le coût ; les connaissances que l'expérimentation fournit et les nouveaux médicaments qu'elle révèle en sont le bénéfice.

La souffrance et la douleur que la captivité et les tests occasionnent aux animaux de laboratoire sont des sujets de controverse même au sein de la communauté scientifique. Les biologistes s'en préoccupent plus qu'autrefois et ils essaient d'atténuer la souffrance des animaux. La mise au point de méthodes

qui supprimeront la détresse des animaux de laboratoire réduira la réticence du public et des scientifiques à utiliser des animaux pour l'expérimentation scientifique. L'opposition que le public manifestait contre la recherche animale semble diminuer, mais les biologistes, les institutions de recherche, les groupes de défense des animaux et ceux qui s'attachent à préciser les règles de l'expérimentation animale restent très préoccupés du problème.

Quatre points de vue sont donnés dans les pages qui suivent. Le premier fait état des coûts de cette expérimentation. Le deuxième montre l'intérêt de l'expérimentation animale. Le troisième, en faveur de l'expérimentation animale, pose les questions éthiques qu'elle soulève. Enfin, le dernier retrace l'histoire du débat. À chacun de se forger sa propre opinion.

Andrew ROWAN dirige le Centre universitaire de recherche animale, à Grafton, aux États-Unis.



Leurres et gaspillage

NEAL BARNARD • STEPHEN KAUFMAN

Les conditions des expérimentations animales sont trop artificielles pour reproduire celles d'une maladie humaine.

L'utilisation d'animaux à des fins expérimentales n'est que l'une des nombreuses techniques de recherche dont les biologistes disposent. Bien que l'expérimentation animale soit parfois intellectuellement séduisante, elle ne permet pas de résoudre les principaux problèmes de santé publique de la fin du XX^e siècle. Pis encore, les expériences animales peuvent tromper les biologistes ou, même, provoquer la mort de malades, faute d'avoir révélé les effets toxiques des médicaments. Heureusement, d'autres méthodes, plus fiables, utilisent mieux les crédits de recherche.

Les conditions artificielles utilisées au cours des expériences réalisées sur des animaux ne sont pas celles qui apparaissent chez l'homme malade, de sorte que les hypothèses fondées sur des observations faites dans ces conditions ne sont que pertes de temps et d'argent.

La plupart des animaux utilisés dans les laboratoires sont ce qu'on nomme des «modèles animaux» : par manipulation génétique, par une intervention chirurgicale ou par injection de substances étrangères, les biologistes déclenchent chez ces animaux des anomalies censées reproduire ce qui se passe chez l'homme. Toutefois, cette procédure est pleine

d'écueils. Sous la pression de l'évolution, d'innombrables différences sont apparues entre les espèces. Les organismes animaux sont composés de plusieurs systèmes (par exemple, un système cardio-vasculaire ou un système nerveux) qui interagissent. Toute stimulation de l'un de ces systèmes perturbe l'ensemble de la physiologie de façon souvent imprévisible. Une telle incertitude met en doute toute extrapolation des résultats de l'animal à l'homme.

Les biais de l'expérimentation animale

Des progrès médicaux notables ont été retardés à cause de résultats fallacieux fournis par des expériences animales. En 1990, David Wiebers et ses collègues de la Mayo Clinic ont décrit dans la revue *Stroke* une étude montrant qu'aucun des 25 produits qui limitaient les lésions due à un choc ischémique (c'est-à-dire à une oxygénation insuffisante du cerveau) chez les rongeurs, les chats et d'autres animaux n'était efficace sur l'homme. Les neurologues expliquèrent ce résultat décevant par les différences entre les accidents vasculaires cérébraux spontanés chez l'homme et ceux qu'ils avaient déclenchés chez l'animal. Ainsi, un animal sain chez

qui on provoque un accident vasculaire cérébral ne présente pas les lésions progressives et lentes des artères qui apparaissent chez l'homme.

De même, au cours des années 1920 et 1930, des études faites sur des singes avaient retardé la lutte contre la poliomyélite : des expériences avaient montré que le poliovirus infecte surtout le système nerveux, mais les biologistes ont découvert ultérieurement que les souches virales administrées avaient une affinité particulière pour le cerveau. Cette conclusion fautive, en contradiction avec des études antérieures montrant que le virus infecte d'abord le système gastro-intestinal, fut à l'origine de mesures préventives inadéquates, qui retardèrent la mise au point d'un vaccin. En 1949, on montrait que le virus se multiplie dans des cultures de tissus humains prélevés sur l'intestin ou sur les membres. Pourtant, au début des années 1950, on utilisait encore, pour fabriquer le vaccin, des cultures de cellules de primates plutôt que des cellules humaines ; des millions de personnes furent ainsi exposées à des virus de singe potentiellement dangereux, car les cultures de cellules auraient pu contenir un micro-organisme infectant les singes !

Un autre exemple illustre les insuffisances de l'expérimentation animale : dans les années 1960, après de nombreuses expériences sur des animaux, des biologistes conclurent que l'inhalation de la fumée du tabac ne produisait pas de cancer du poumon (appliqué directement sur la peau de rongeurs, le goudron de la fumée y fait apparaître des tumeurs, mais ces résultats furent négligés). Pendant des années, les producteurs de tabac ont utilisé ces résultats pour rassurer les fumeurs, retarder les mesures antitabac et éviter que les médecins ne dissuadent leurs patients de fumer.

La plupart des observations réalisées au cours d'expériences sur des animaux ne reflètent pas la biologie des espèces étudiées...

... en raison des conditions artificielles qui ont déclenché la maladie étudiée...



Pourtant, des études épidémiologiques réalisées sur les fumeurs ont irréfutablement prouvé que le tabac provoque le cancer du poumon.

L'enfermement et les manipulations provoquent un stress qui modifie la physiologie des animaux et introduit une variable expérimentale supplémentaire qui rend encore plus contestable l'extrapolation des résultats de l'animal à l'homme. Le stress des animaux de laboratoire les rend plus sensibles aux maladies infectieuses et à certaines tumeurs, et il perturbe leurs concentrations en hormones et en anticorps, ce qui risque de modifier le fonctionnement de divers organes.

Les animaux sont également utilisés pour l'évaluation de l'innocuité des médicaments et des substances chimiques ; à nouveau, ces études sont dénuées de fiabilité, car les résultats diffèrent selon les espèces testées. Ainsi, en 1988, Lester Lave, de l'Université Carnegie Mellon, a publié dans la revue *Nature* le résultat d'une étude du pouvoir cancérigène de 214 composés, étudiés simultanément sur des rats et sur des souris : les résultats ne concordaient que dans 70 pour cent des cas. Les résultats d'une comparaison entre l'homme et des animaux auraient sans doute été pires. De surcroît, David Salsburg, des Laboratoires *Pfizer*, a noté que, sur 19 produits chimiques reconnus cancérigènes quand l'homme les ingère, sept seulement provoquent des cancers chez la souris et chez le rat.

Plus généralement, de nombreuses substances qui semblaient dénuées de risques après avoir été testées sur des animaux et qui avaient même reçu l'autorisation de mise sur le marché se sont révélées dangereuses. La milrinone, qui augmente le débit cardiaque, améliore le taux de survie de rats chez qui l'on provoque artificiellement des troubles cardiaques ;

pourtant, ce produit a augmenté de 30 pour cent la mortalité des personnes atteintes d'une insuffisance cardiaque chronique grave. La fialuridine, un antiviral, avait semblé tout à fait sûr au cours des essais sur l'animal ; il a pourtant entraîné des troubles hépatiques chez 7 des 15 personnes traitées (cinq sont mortes à la suite du traitement et les deux autres ont dû subir une greffe de foie). Un analgésique, très utilisé au début des années 1980, fut retiré du marché après avoir été mis en cause dans 14 décès et dans des centaines de réactions allergiques graves. La nomifensine, un antidépresseur quasi dépourvu de toxicité chez le rat, le lapin, le chien et le singe, avait, chez l'homme, une toxicité hépatique notable, génératrice d'anémies, rares mais graves, parfois même fatales (le produit n'est resté sur le marché que quelques mois).

Ces cas ne sont pas isolés. L'Office américain du médicament a réexaminé 198 des 209 médicaments introduits sur le marché entre 1976 et 1985, et a constaté que 52 pour cent d'entre eux présentaient des risques qui n'avaient pas été mis en évidence lors des expériences sur l'animal ou lors des essais cliniques limités pratiqués sur l'homme. Les effets secondaires néfastes entraînaient une hospitalisation, une invalidité, voire la mort. Certains de ces médicaments ont été retirés du marché, d'autres ont simplement été accompagnés d'une nouvelle notice qui présente les risques. Inversement, on ne peut estimer le nombre des médicaments, qui auraient été actifs chez l'homme, et auxquels on a renoncé parce qu'ils étaient inefficaces ou toxiques chez l'animal.

Les chercheurs disposent aujourd'hui de meilleures méthodes que l'expérimentation animale : études épidémiologiques, essais cliniques, observations pertinentes complé-

tées par des tests en laboratoire, cultures de tissus et de cellules humaines, autopsies, examens endoscopiques, biopsies, nouvelles méthodes d'imagerie. Enfin, une nouvelle discipline, l'épidémiologie moléculaire, qui étudie les liens entre les facteurs génétiques, métaboliques et biochimiques et les données épidémiologiques, facilite l'identification des causes des maladies humaines.

De meilleures méthodes

De ce point de vue, la recherche des liens entre l'athérosclérose et les maladies cardiaques est exemplaire. Les premières études épidémiologiques, qui datent de 1948, ont mis en évidence les principaux facteurs de risque des maladies cardiaques : une concentration en cholestérol et une tension artérielle trop élevées, ainsi que le tabac. Au cours d'autres études réalisées dans les années 1970 et 1980, les épidémiologistes ont montré, notamment, que toute diminution de un pour cent de la concentration en cholestérol réduit de plus de deux pour cent le risque cardiaque. Des résultats d'autopsies et des études chimiques ont confirmé le rôle des facteurs de risque identifiés et une alimentation riche en graisses. Inversement, d'autres études ont mis en évidence qu'une alimentation végétarienne contenant peu de graisses, une pratique sportive régulière, l'absence de consommation de tabac et un stress limité font régresser les plaques qui obstruent les artères et sont responsables des maladies cardiaques.

De même, les recherches sur l'infection par le VIH menées sur l'homme ont montré comment le virus se transmet et ont guidé la définition des programmes de prévention. Les expériences *in vitro*, à partir de cellules et de sang humains, ont permis l'identi-



- La recherche sur les accidents vasculaires cérébraux
- La recherche sur la poliomyélite
- La recherche sur le cancer du poumon
- La recherche sur les anomalies du développement

fication du virus du SIDA et de certains de ses mécanismes d'action. Puis l'efficacité et l'innocuité des principaux médicaments contre le SIDA, tels l'AZT et les inhibiteurs de protéases, ont été testés *in vitro*. Les spécialistes du SIDA ont utilisé beaucoup d'animaux, mais sans résultats tangibles. Dans certains cas, les données issues de l'expérimentation animale n'ont fait que confirmer des informations déjà acquises.

En 1993 et 1994, Gerard Nuovo et ses collègues de l'Université de Stony Brook avaient déterminé le cheminement du VIH chez la femme (le virus pénètre par les cellules du col de l'utérus et gagne les ganglions lymphatiques voisins), après avoir étudié des biopsies de ganglions cervicaux et lymphatiques. D'autres biologistes ont ensuite introduit le virus de l'immunodéficience simienne, le VIS, dans le vagin de singes rhésus, ils ont sacrifié les animaux et disséqué leurs organes ; en 1996, ils sont arrivés aux mêmes conclusions que celles tirées des biopsies humaines. À quoi bon ?

Les recherches sur les malformations des nouveau-nés se sont fondées sur des expérimentations animales, bien que l'on ne puisse généralement pas extrapoler les résultats de l'animal à l'homme. Le nombre des malformations à la naissance augmente régulièrement. Des études épidémiologiques ont établi un lien entre tabac et cancer, ou entre cholestérol et maladies cardiovasculaires. Elles seront indispensables à la recherche d'éventuels facteurs génétiques ou environnementaux associés à ces malformations. De telles études ont déjà révélé des malformations du tube neural en cas de déficit en folates ou d'abus d'alcool par la mère. Si l'expérimentation animale fut naguère utile, elle ne permet plus de démontrer correctement l'efficacité et l'innocuité des

médicaments. Avant la mise au point des cultures de cellules et de tissus, les biologistes devaient contaminer des animaux afin de conserver des agents infectieux, pour produire des vaccins notamment. Aujourd'hui ce n'est plus guère le cas ; les méthodes actuelles de production des vaccins sont plus efficaces et plus sûres. Les tests de toxicité des médicaments qui avaient établi l'efficacité de la digitaline et de l'insuline, par exemple, ont été remplacés par des tests de laboratoire, où l'on ne se sert plus d'animaux.

Les modèles animaux présentent parfois des analogies avec l'homme, mais une simple analogie ne peut confirmer ni réfuter une théorie. De ce fait, il est illogique de vérifier sur des animaux une théorie appliquée à l'homme. Quand des scientifiques discutent de la validité de théories médicales ou biologiques, ils présentent souvent les résultats d'expérimentations animales, mais ces résultats ne sont que des armes rhétoriques. En utilisant différents types d'animaux et différents protocoles, les expérimentateurs peuvent confirmer n'importe quelle théorie ou presque : des expériences animales ont «prouvé» que le tabac provoque le cancer et d'autres... qu'il n'est pas en cause.

De fausses preuves

Les défenseurs de l'expérimentation animale insistent souvent sur le rôle historique qu'ont eu de telles expériences, mais leurs interprétations sont souvent tendancieuses. Ils citent souvent l'exemple de la recherche sur le diabète : en 1890, Oskar Minkowski déclenche expérimentalement un diabète sucré chez des chiens auxquels il a enlevé le pancréas. Pourtant Thomas Cawley, Richard Bright et Appollinaire Bouchardat, au XVIII^e et au XIX^e siècles, avaient déjà établi le lien entre lésions

du pancréas et diabète en observant leurs patients. Ce sont aussi des études humaines qui, en 1869, ont permis à Paul Langerhans de découvrir les cellules qui produisent l'insuline. Selon les partisans de l'expérimentation animale, si l'on avait testé la thalidomide sur des animaux, on aurait découvert, avant qu'il ne soit trop tard, que l'administration du médicament aux femmes enceintes provoque des malformations de l'enfant. Pourtant, à part les lapins et quelques primates, la plupart des espèces animales utilisées en laboratoire ne présentent pas, après administration de thalidomide, les anomalies des membres constatées chez l'homme. Après chaque expérimentation animale visant à étudier les malformations à la naissance, les biologistes sont perplexes : l'homme est-il plus proche des animaux qui présentent des malformations ou de ceux qui n'en ont pas ?

Nous n'avons pas abordé ici les questions éthiques, pourtant fondamentales, que soulève l'expérimentation animale. Au cours des dernières décennies, les scientifiques ont pris conscience de la complexité du monde animal et, notamment, de l'aptitude des animaux à communiquer, de l'étendue du registre de leurs sensations et de l'existence de structures sociales élaborées. Toutefois, les problèmes techniques que pose l'expérimentation animale et les insuffisances de cette pratique devraient inciter les bailleurs de fonds à répartir autrement les budgets de recherche.

Neal BARNARD, médecin, préside le Comité des médecins américains pour une pratique médicale responsable. Stephen KAUFMAN, médecin, est le coprésident du Comité pour la modernisation de la recherche médicale.

Les chercheurs disposent de meilleures méthodes



Progrès et sécurité

JACK BOTTING • ADRIAN MORRISON

L'efficacité des médicaments et des protocoles opératoires est validée par l'expérimentation animale.

L'expérimentation animale a joué un rôle essentiel lors de la mise au point des traitements médicaux modernes, et elle sera nécessaire aussi longtemps que l'on cherchera à soulager les maladies anciennes et à réagir contre les nouveaux fléaux. Naturellement l'expérimentation animale n'est que l'une des méthodes disponibles, mais elle est parfois irremplaçable. Nous verrons ici dans quels cas la recherche animale a été essentielle par le passé, et dans quels domaines elle sera vitale demain. Comme tous les domaines de la médecine sont redevables à l'expérimentation animale, nous n'aurons pas la place de les citer tous, et nous nous limiterons à quelques exemples.

Au milieu du XIX^e siècle, la plupart des maladies graves étaient des infections bactériennes ou virales, mais on pensait alors qu'elles résultaient de dysfonctionnements internes. C'est Louis Pasteur qui a montré, en étudiant des animaux domestiques malades, que des micro-organismes pathogènes externes sont responsables des maladies infectieuses. Parce qu'il savait comment des micro-organismes gâtent le vin et la bière, Pasteur supposa que des micro-organismes déclenchent le choléra du poulet et le charbon du mouton ou du porc.

Pour vérifier son hypothèse, Pasteur analysa le contenu de l'intestin de poulets atteints du choléra, et en isola un microbe qu'il cultiva. Il administra des extraits de cette culture à des poulets et à des lapins sains : ils eurent le choléra, démontrant ainsi que Pasteur avait bien identifié le micro-organisme pathogène. Heureusement, il remarqua qu'après un certain temps les cultures perdaient leur pouvoir infectieux et que des poulets auxquels on avait injecté ces cultures inactives résistaient ensuite aux microbes qui tuaient les poulets non traités. Les médecins avaient d'ailleurs observé que les personnes ayant survécu à une maladie infectieuse grave contractaient rarement une seconde fois la même maladie. Avec ses expériences, Pasteur avait enfin trouvé un moyen de rendre les animaux résistants à diverses maladies sans les rendre malades. Il en déduisit qu'en administrant un inoculum atténué d'une bactérie pathogène à des patients, il pourrait les immuniser contre les maladies infectieuses.

Par des expériences sur des lapins et sur des hamsters, Pasteur isola le microbe du charbon et mit au point un vaccin contre cette maladie. Grâce à ces informations, obtenues par des expérimentations animales – qui n'auraient

évidemment jamais pu être réalisées sur l'homme –, il prouva que les micro-organismes sont les agents des maladies infectieuses et que la vaccination en protége.

Les découvertes de Pasteur ont eu des conséquences considérables. Par exemple, elles incitèrent le chirurgien britannique Joseph Lister à stériliser ses instruments chirurgicaux, les fils de suture et les pansements : la chirurgie progressa d'un coup, parce que les malades ne mouraient plus d'infection. En 1875, la reine Victoria lui demanda de faire une communication à la Commission royale sur la vivisection, en espérant qu'il ferait «une déclaration condamnant ces pratiques horribles». Lister, qui était un quaker, s'était publiquement élevé contre certaines pratiques sociales de l'époque, mais il ne condamna pas la vivisection, malgré la requête de la souveraine. Devant la Commission royale, il déclara que les expérimentations animales avaient été indispensables à ses recherches sur l'asepsie et que, si on limitait l'expérimentation animale, on se priverait de découvertes fondamentales pour le bien-être de l'humanité.

Des dizaines de vaccins et d'antibiotiques

Pasteur et ses continuateurs ont trouvé les agents de nombreuses maladies infectieuses et mis au point les vaccins correspondants : contre la diphtérie, le tétanos, la rage, la coqueluche, la tuberculose, la poliomyélite, la rougeole, les oreillons, la rubéole... L'étude de ces maladies a incontestablement progressé grâce à l'expérimentation animale : après avoir identifié les micro-organismes potentiels, les chercheurs les ont inoculés à des animaux pour vérifier que la maladie étudiée se déclenchait.

Les expériences sur animaux ont été indispensables à la mise au point de médicaments efficaces et le resteront encore longtemps.



Seule l'expérimentation animale permet aux chercheurs de répondre à certaines questions

Aujourd'hui, de telles études continuent. Récemment, on a mis au point un vaccin contre *Hemophilus influenzae* de type B, responsable de la plupart des méningites qui, jusqu'en 1993, tuaient plusieurs centaines d'enfants par an dans les pays industrialisés ou laissaient des séquelles neurologiques graves. Tandis que les premiers vaccins ne conféraient qu'une immunité médiocre, le vaccin préparé et testé sur des lapins et des souris est beaucoup plus efficace. Les méningites dues à *Hemophilus influenzae* de type B ont notablement diminué depuis l'introduction de ce vaccin.

On doit à la recherche animale la fabrication de nouveaux vaccins contre les maladies infectieuses, ainsi que la mise au point d'antibiotiques. Jusqu'en 1935, malgré les précautions prises, des blessures bénignes entraînaient parfois des infections graves nécessitant une amputation ou entraînant la mort. De même, 200 accouchées sur 100 000 décédaient d'infection puerpérale, une maladie due à un streptocoque hémolytique et qui frappait les parturientes. Enfin, sur 100 000 hommes de 45 à 64 ans, 60 environ mouraient d'une pneumonie. Les sulfamides ont sauvé un nombre de vies considérable : aux alentours de 1960, seulement cinq mères sur 100 000 contractaient une infection puerpérale, et six hommes sur 100 000 d'une cinquantaine d'années succombaient d'une pneumonie. D'autres infections furent également traitées par ces médicaments nouveaux.

Or comment découvrit-on les sulfamides ? L'équipe qui s'intéressait à ces composés, Gerhard Domagk et ses collègues des Laboratoires *Bayer*, voulait que toutes leurs molécules soient testées sur des souris infectées plutôt que sur des cultures de bactéries. Cette perspicacité porta ses fruits : un des composés se révéla très efficace

sur la souris, mais sans effet sur des cultures de bactéries, parce qu'un sous-produit antibactérien actif, le sulfanilamide, se formait dans l'organisme (mais pas dans les bactéries) à partir du prontosil administré. D'autres sulfamides, encore plus efficaces, ont été synthétisés et utilisés contre de nombreuses infections. G. Domagk reçut le prix Nobel en 1939 pour son travail sur les substances antibactériennes.

Inversement, l'utilisation de la pénicilline fut retardée de dix ans parce qu'on ne l'avait pas testée sur des animaux. En 1929, Alexander Fleming ne testa pas sur des souris l'efficacité de ses extraits de pénicilline (bien qu'il ait montré qu'ils n'étaient pas toxiques pour les souris ni pour les lapins). En 1940, à Oxford, Howard Florey et Ernst Chain démontrèrent l'effet antibiotique de la pénicilline en pratiquant des tests systématiques sur la souris.

Les greffes d'organes

Malgré l'efficacité des vaccins et des antibiotiques, les maladies infectieuses restent la plus grande menace pour l'humanité : on ne dispose d'aucun vaccin efficace contre le paludisme ou contre le SIDA ; des souches de bactéries résistantes aux antibiotiques apparaissent, et de nouvelles maladies infectieuses émergent. On imagine mal comment, sans expérimentation animale, on pourrait fabriquer des vaccins ou des médicaments nouveaux et plus efficaces contre ces maladies.

Les recherches sur les animaux ont également été indispensables dans d'autres domaines médicaux. Ainsi la chirurgie à cœur ouvert est presque une opération de routine, grâce aux 20 années de recherche sur l'animal. De même, les greffes de valves cardiaques ne sont aujourd'hui possibles qu'en raison des expériences effectuées sur les animaux pendant des années.

Le traitement des anomalies rénales est l'application à l'homme de techniques mises au point sur l'animal. La dialyse rénale et, parfois, les greffes de reins sauvent des patients atteints d'un dysfonctionnement rénal à la suite de diverses maladies telles qu'une intoxication, une hémorragie, une hypertension ou un diabète.

Les greffes de rein ou d'autres organes vitaux provoquent une foule de complications qui ont été progressivement résolues par des recherches sur des animaux. Grâce à des expériences pratiquées sur des chats, on a mis au point des techniques fiables pour relier les vaisseaux sanguins du receveur et de l'organe greffé, de façon que la suture résiste à la pression artérielle. Des immunologistes ont également employé des lapins, des rongeurs, des chiens et des singes pour trouver les moyens d'éviter les rejets de greffe par le système immunitaire.

Et la liste est encore longue. Il y a quelques dizaines d'années à peine, les malades atteints d'hypertension maligne mouraient en moins d'un an, après avoir perdu la vue et souffert de violents maux de tête. Les recherches effectuées, dans les années 1950, sur des chats anesthésiés ont permis aux médecins d'améliorer progressivement le traitement de l'hypertension : aujourd'hui, ce traitement est efficace et relativement anodin. De même, on traitait les ulcères gastriques par des actes chirurgicaux qui n'étaient pas dénués de risques. Grâce à des substances anti-ulcéreuses élaborées à partir de tests réalisés sur des rats et sur des chiens, on jugule les ulcères et, parfois même, on les guérit quand on administre aussi des antibiotiques qui éliminent l'agent infectieux, *Helicobacter pylori*.

Les défenseurs du «droit des animaux» prétendent que les expériences animales sont inutiles et trompeuses,

Résultats concrets

- Mise au point des antibiotiques
- Mise au point de vaccins
- Chirurgie à cœur ouvert
- Recherches sur le diabète
- Traitement de l'hypertension
- Mise au point d'un médicament contre l'ulcère d'estomac
- Transplantation d'organes : valves cardiaques, reins...

parce que les diverses espèces ont des physiologies différentes et des réactions aux médicaments trop variables pour être utiles. Des analyses précises suffisent généralement pour réfuter ces affirmations. Ils citent souvent la thalidomide comme exemple d'un médicament testé sur l'animal, mais qui ne révéla ses effets tératogènes que sur l'homme. Leur exemple est très mal choisi ! La thalidomide n'avait pas été testée sur des animaux en cours de gestation avant d'être utilisée chez l'homme. Et, après les accidents constatés chez les nouveau-nés humains, les biologistes ont confirmé le pouvoir tératogène de la thalidomide chez le lapin, la souris, le rat, le hamster et plusieurs espèces de singes.

En réalité, la physiologie des animaux de laboratoire et celle des hommes se ressemblent beaucoup. La biochimie des uns et des autres est commandée par des hormones chimiquement analogues ou identiques ; de même, les cellules nerveuses des uns et des autres émettent les mêmes neuromédiateurs vers le système nerveux central ou périphérique, et tous les organismes réagissent de la même façon lors des infections ou des lésions tissulaires.

Les adversaires de l'expérimentation animale critiquent les modèles animaux parce que, disent-ils, les animaux n'ont pas la même physiologie que l'homme. Là n'est pas la question : on ne demande pas aux animaux d'imiter la physiologie humaine, mais d'apporter des réponses à des questions particulières. Ainsi, la mucoviscidose des souris ne reproduit pas exactement la maladie humaine (laquelle ne se manifeste pas de la même façon chez tous les malades), mais elle sert de modèle pour les recherches en thérapie génique. Les adversaires de l'expérimentation animale prétendent aussi que l'on pourrait éviter la plu-

part des maladies en changeant de mode de vie : en adoptant, par exemple, un régime végétarien. Nous sommes partisans de conditions de vie saines, mais ces mesures seraient *a priori* sans effet dans les exemples cités.

Un trou noir

Selon nos adversaires, les expérimentations animales ont peut-être contribué aux progrès de la médecine, mais elles n'étaient pas indispensables pour autant : si ces pratiques avaient été interdites, les chercheurs auraient été plus créatifs et ils auraient inventé des méthodes plus élaborées. La suppression de l'expérimentation animale n'aurait pas laissé la place à «un trou noir géant», mais aurait favorisé la mise au point de recherches cliniques et de recherches *in vitro* mieux conduites.

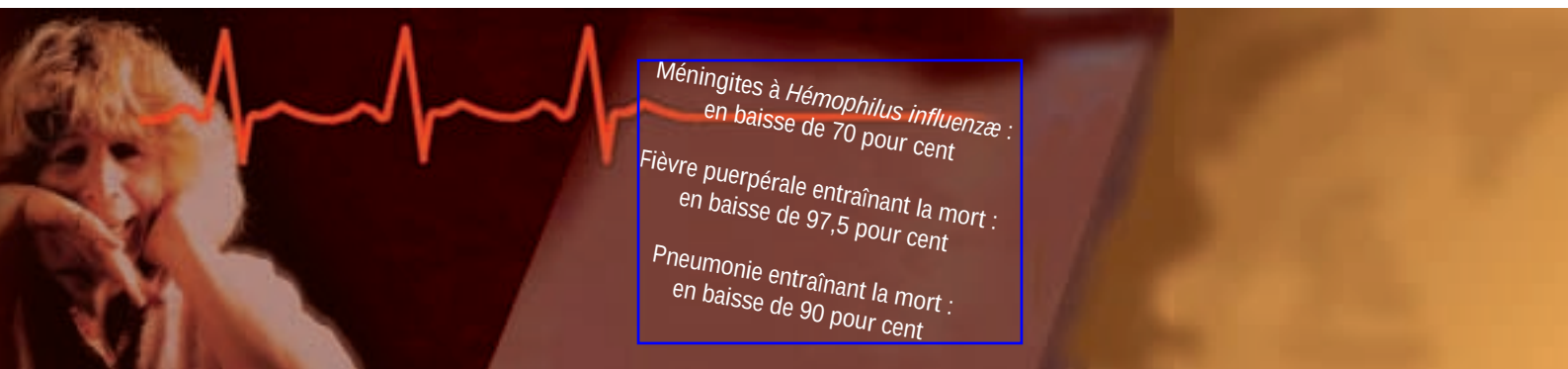
L'argument est particulièrement mal venu, car il y eut un trou noir dramatique ! Les traitements n'ont guère progressé tant que la science biomédicale n'a pas disposé de bases empiriques solides, grâce à l'expérimentation animale. Ni Pasteur, ni William Harvey qui, au XVII^e siècle, étudia la circulation du sang chez les animaux, n'ont expérimenté sur l'animal de gaieté de cœur. Ils ont utilisé toutes les techniques disponibles à leur époque : parfois la dissection d'un cadavre, parfois l'examen des malades, parfois l'observation de bactéries en culture. Puis ils ont été contraints d'expérimenter sur l'animal.

Nous proposons un petit exercice à ceux qui considèrent que l'expérimentation animale a retardé le progrès médical : qu'ils choisissent un progrès dû à l'expérimentation animale et qu'ils cherchent une autre méthode par laquelle on serait arrivé au même résultat. Comment aurait-on obtenu le traitement de l'insuffisance mitrale, mis au point grâce à des expérimen-

tations animales, par exemple ? Ce trouble cardiaque est dû à une anomalie de la valve mitrale. La fabrication de prothèses de valves cardiaques est le fruit de plusieurs années de recherches et de tests pratiqués sur des chiens et sur des veaux. On ne peut implanter la valve artificielle que sur un cœur au repos, après avoir détourné la circulation sanguine à l'aide d'un dispositif dont la mise au point a exigé 20 années d'expérimentation sur des chiens. Aux adversaires de l'expérimentation animale de proposer une autre méthode de traitement de l'insuffisance mitrale dont l'efficacité serait comparable à celle qui est pratiquée aujourd'hui, après 35 années d'efforts.

L'expérimentation animale reste-t-elle aujourd'hui indispensable ? Les animaux transgéniques, qui ont un seul gène muté, ont déjà apporté d'innombrables informations sur la fonction des protéines et sur leur rôle dans certaines maladies ; ils promettent des progrès considérables, notamment dans la lutte contre les maladies du système nerveux central. On admettait naguère que les cellules nerveuses de la moelle épinière des mammifères perdent à tout jamais leur fonctionnalité après avoir été endommagées ; pourtant certaines expériences animales récentes ont montré que la régénération de ces neurones est possible. Des traitements seront mis au point, mais il faudra peut-être beaucoup de temps. Nous sommes convaincus que les progrès, en sciences biologique et médicale, passent nécessairement par l'expérimentation animale.

Jack BOTTING a été conseillé de la Société de défense de la recherche, à Londres. Adrian MORRISON dirige le Laboratoire de neurophysiologie du sommeil à l'Université de médecine vétérinaire de Pennsylvanie.



L'expérimentation vitale

PIERRE TAMBOURIN

L'expérimentation animale fait progresser la biologie et la médecine, mais elle doit être acceptable sur le plan éthique.

Il est coutumier et probablement assez exact de dater les débuts de l'expérimentation animale et des débats passionnés qui l'entourent, à l'époque de Claude Bernard, l'auteur de *L'introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. C'est aussi à cette époque que naît l'ère moderne de la biologie et de la médecine. Grâce à Darwin, à Pasteur, à Claude Bernard, notamment, la biologie et la médecine passent de la préhistoire à l'histoire.

Les rapports entre l'homme et l'animal ont toujours été complexes. L'homme a d'abord chassé et tué, pour se défendre, pour se nourrir, ou pour se protéger du froid et se vêtir. Au cours de cette longue préhistoire commune, des relations d'une autre nature se sont progressivement établies entre l'homme et certaines espèces animales. Asservi, l'animal domestiqué n'était plus un être vivant hostile.

Il pouvait devenir une aide précieuse pour le travail, un complice parfois. Les rapports ont changé et ont conduit à une forme de respect, au nom de la dignité et de la grandeur de l'homme. Cette évolution transparaît chez les philosophes de l'Antiquité, mais aussi de l'ère moderne, et dans certaines religions qui appellent à des degrés divers au respect de l'animal et au devoir de l'homme à son égard.

L'étude sur l'animal, par la difficulté des questions qu'elle pose sur les rap-

ports entre l'homme et l'animal, nous oblige à répondre aux interrogations qu'elle suscite légitimement. Ici, l'homme sacrifie l'animal, non pour se vêtir, se nourrir ou se défendre, non par jeu inutile, mais pour mieux connaître les lois de la nature et, le plus souvent, pour améliorer sa propre santé et, par voie de conséquence, celle de l'animal.

C'est probablement en raison des difficultés éthiques que soulève cette question, que nombre d'opposants à l'expérimentation animale, nombre de débats, évitent, consciemment ou inconsciemment, de poser la seule question qui mérite de l'être : en admettant, *a priori*, que l'étude sur l'animal est utile au développement des connaissances, à la science, à la médecine et à l'art vétérinaire, c'est-à-dire en considérant qu'elle est indispensable, l'homme a-t-il le droit de tuer un animal au nom de sa soif de connaissances ou au nom de sa propre santé? Au lieu de cela, les débats se situent sur un terrain apparemment plus simple, mais certainement plus controversé : cette forme d'expérimentation est-elle utile à la connaissance scientifique et médicale?

Qui pourrait soutenir longtemps la légitimité d'une expérimentation animale dont on démontrerait qu'elle est inutile? Il est du devoir des chercheurs et des médecins de s'interroger en permanence sur la pertinence d'une expérience pratiquée sur l'animal, surtout

quand cet animal risque de souffrir. Chacun est en droit de connaître les tenants et les aboutissants des expériences pratiquées dans nos laboratoires, à condition que cette demande n'ait pas pour vocation première de perturber le travail des chercheurs. C'est pour cette raison que la mise en place de comités d'éthique me semble une nécessité peu discutable.

L'Académie des sciences en France et aux États-Unis, l'Académie de médecine, l'Académie vétérinaire, l'INSERM, le CNRS, la quasi-totalité des scientifiques et des médecins ont publié des documents très clairs, des livres blancs, sur l'absolue nécessité de l'étude sur l'animal pour aborder certains problèmes scientifiques et médicaux.

Sans en tenir compte, les opposants forcenés de l'expérimentation animale utilisent toujours les mêmes images, les mêmes arguments historiquement et scientifiquement biaisés, les mêmes insultes, les mêmes menaces et publient des articles destinés à une minorité d'activistes dont le seul but est, par les moyens les plus odieux, d'arrêter la pratique de l'expérimentation animale et d'éviter qu'on ne réponde aux questions essentielles. Cette attitude est regrettable, car elle ne permet guère d'avancer sur le terrain de l'éthique qui mérite pourtant toute notre attention.

Le fondement éthique de l'expérimentation animale, dans nos sociétés, vient d'un principe essentiel qui dicte notre conduite et nos attitudes : le devoir de tout homme de prêter assistance à son prochain, de lui prodiguer les soins nécessaires en cas de maladie ou d'accident. Le serment d'Hippocrate prêté par les médecins illustre ce principe avec clarté. Nos lois nous y obligent.

L'homme sait, par ailleurs, que le développement de ses connaissances, grâce aux recherches, lui a souvent permis de comprendre les causes et les mécanismes à l'origine des pathologies



Les conditions éthiques de l'expérimentation animale doivent être respectées



qui l'accablent et de trouver de nouvelles méthodes efficaces de traitement. L'histoire de la science et de la médecine est jalonnée de tels progrès décisifs. Néanmoins, bien que la plupart des lois universelles de la biologie aient été établies chez l'animal, certains affirment qu'en raison des différences entre l'animal et l'homme, ce qui est vrai pour l'animal ne saurait être extrapolé à l'homme. C'est oublier que les lois de l'hérédité ont été découvertes chez les végétaux, puis chez la souris, que les règles gouvernant les transplantations d'organes ont été établies chez la souris, et que les expériences permettant de définir les principes de la vaccination et de la prévention des maladies sont directement dérivées des études conduites par Pasteur chez la poule, le mouton, puis seulement chez l'homme.

Aujourd'hui, pour trouver un vaccin contre l'hépatite C ou contre le SIDA, comprendre les mécanismes de l'athérosclérose, du diabète, de l'ostéoporose, de l'obésité, trouver de nouveaux gènes du cancer, améliorer les pratiques chirurgicales, comprendre la complexité du système nerveux central, normal ou pathologique, les chercheurs utilisent des modèles animaux de ces maladies. L'épilepsie, par exemple, peut certes être étudiée *in vitro*, mais la complexité de la crise épileptique, qui touche près de 500 000 personnes en France, nécessite aussi, et pour longtemps encore, de travailler sur des animaux.

Ces quelques exemples illustrent l'ampleur des questions qui restent ouvertes et l'incompréhension des chercheurs ou des médecins lorsqu'on leur demande de se limiter à des études *in vitro*. L'attitude de certains extrémistes, qui contredit plusieurs siècles d'histoire de la science et de la médecine, n'est pas sans rappeler le comportement des négationnistes.

Ainsi, malgré l'ensemble des méthodes d'investigation dont dis-

posent les scientifiques et les médecins, ceux-ci sont parfois contraints de faire des expériences sur l'animal vivant. Chaque chercheur doit alors s'interroger : « Mon expérience est scientifiquement légitime, mais suis-je cependant autorisé à la pratiquer, n'importe où, n'importe comment ? »

Des contraintes éthiques

Sur ce terrain, le débat éthique a progressé au cours des dernières années. Aussi légitime soit-elle, une expérience nécessite d'être faite en limitant au maximum la souffrance de l'animal et en évitant toute mort inutile. Les conditions de l'expérience doivent être les meilleures possibles. La qualité des installations et la formation des personnes qui y travaillent sont essentielles.

Une autre critique formulée par les adversaires de l'expérimentation animale tient à la façon dont les laboratoires se procurent les animaux. Pour des raisons qui ne tiennent pas uniquement à l'expérimentation, des trafics scandaleux d'animaux existent encore. Les trafiquants prélèvent dans la faune sauvage des animaux dans des conditions inacceptables, ou volent des animaux. Même si de telles pratiques sont très rares, elles sont illégales, intolérables et doivent évidemment être rejetées. Nul ne peut se prévaloir de l'intérêt d'une expérience pour transgresser la loi.

En France, les organismes publics de recherche sont très vigilants et prêts à coopérer avec toutes les associations de protection animale qui auraient connaissance de tels trafics. De surcroît, les organismes publics de recherche ont pris l'engagement de n'acheter que des animaux d'élevage qui, d'une part, sont les seuls à garantir la qualité sanitaire et génétique des animaux utilisés et, d'autre part, évitent de participer aux trafics. La recherche ne doit plus servir d'alibi ou d'otage à des individus peu scrupuleux.

Le nombre d'animaux utilisés diminue chaque année en raison de l'évolution des connaissances et de la prise de conscience des responsabilités de l'homme face à l'animal. Ainsi, les chercheurs participent à la mise au point de méthodes dites « substitutives » qui remplacent progressivement les méthodes *in vivo* et limitent au strict minimum le nombre d'animaux utilisés, surtout dans les études de toxicologie. Parmi ces méthodes substitutives, citons les études épidémiologiques, les simulations sur ordinateur, les études réalisées sur des organes maintenus en survie artificielle et les cultures cellulaires.

Toutefois, les méthodes alternatives d'expérimentation nécessitent aussi de sacrifier des animaux pour prélever des cellules ou des organes, et elles ne sont pas toutes – loin s'en faut – validées. Ces méthodes ne donnent pas des résultats facilement transposables à l'homme (pas plus d'ailleurs que certaines études conduites sur l'animal). La science progresse en s'appuyant sur des modèles qui ne sont jamais totalement satisfaisants, mais ce sont les seuls dont on dispose dans notre quête de la connaissance. La rigueur s'impose dans la démarche scientifique, et nous oblige à répéter les expériences dans plusieurs systèmes. Aucune technique, aucune méthode d'approche de questions complexes, ne peut prétendre *a priori* à l'universalité. Personne n'expérimente avec plaisir sur un animal vivant. Pourtant aucun chercheur, aucun médecin ne peut prédire quand l'homme cessera d'avoir recours à l'expérimentation animale, ni même s'il pourra un jour s'en dispenser totalement.

Pierre TAMBOURIN dirige le Département des Sciences de la vie du CNRS.

Limitier la recherche expérimentale,
c'est refuser des découvertes
dont bénéficierait
l'humanité tout entière

L'évolution de l'expérimentation animale

MADHUSREE MUKERJEE

La communauté scientifique et le public se préoccupent de plus en plus du bien-être des animaux, ce qui modifie les conditions de leur utilisation par les chercheurs.

Le nombre des animaux utilisés par les laboratoires de recherche diminue. Dans plusieurs pays européens, il a diminué de moitié depuis les années 1970. Au Canada, les mammifères ont souvent été remplacés par des poissons. Aux États-Unis, les chercheurs utilisent 18 à 22 millions d'animaux par an, essentiellement des rats, des souris et des oiseaux. L'utilisation des primates s'est stabilisée, celle des chiens et des chats a diminué de moitié. Pourquoi cette tendance?

Parce que, en 1975, les associations de défense des droits des animaux se sont activées, après la publication d'un livre du philosophe australien Peter Singer, qui décrivait crûment le monde de la recherche et les pratiques biologiques. Cette publication, suivie d'une série de manifestations publiques, a discrédité la recherche biomédicale et suscité un mouvement public en faveur des animaux. Dian Fossey, Jane Goodall et d'autres éthologues ont passionné le public en racontant des

histoires d'amour, de tristesse, de jalousie et de tromperie chez les primates. Ces conceptions anthropomorphiques ont été le terreau des lois restreignant l'expérimentation animale.

Puis les scientifiques eux-mêmes ont évolué ; les nouveaux biologistes adhèrent partiellement aux idées des défenseurs des droits des animaux, et beaucoup d'entre eux sont préoccupés par le dilemme moral de l'expérimentation animale. Certaines expériences qui eurent du succès dans les années 1950 ne seraient plus faites aujourd'hui, car elles seraient accusées de trop faire souffrir les animaux. Progressivement, les progrès du génie génétique conduisent au remplacement de l'expérimentation animale par des expériences faites dans des éprouvettes.

Les philosophes

Des arguments philosophiques et scientifiques, plus que religieux, ont étayé ces changements. Selon la Bible, Dieu fit

l'homme à son image et lui donna tout pouvoir sur les autres créatures. Et si les hindouistes et les bouddhistes considéraient que les organismes vivants sont hiérarchisés, sans que l'homme soit nettement séparé des autres, leur influence sur le mouvement des droits des animaux a été limité. Le mouvement a pris racine dans une philosophie laïque ; dès 1780, l'avocat anglais Jeremy Bentham se demandait s'il existait une «barrière infranchissable» entre l'homme et les animaux, et il s'interrogeait : «La question n'est pas, les animaux raisonnent-ils ? Communiquent-ils ? Mais plutôt souffrent-ils ?»

Darwin, qui publia sa théorie de l'évolution en 1859, admettait que l'on utilise des animaux pour mieux comprendre l'homme, mais il pensait aussi que l'homme n'est pas le seul organisme vivant sensible. Il était préoccupé par les souffrances causées par les expérimentations animales. Au XIX^e siècle, en Angleterre, expérimentateurs et défenseurs des animaux s'affrontèrent.



rent, jusqu'à la publication, en 1876, de l'Acte britannique contre la cruauté envers les animaux (*The British Cruelty to Animals Act*) qui imposa les règles de l'expérimentation animale. Toutefois, jusque vers 1970, l'explosion des recherches médicales l'a emporté, et les mouvements de défense des animaux sont passés au second plan.

Dans les années 1970, P. Singer réclama qu'avant de faire une expérimentation animale on fasse le bilan de tous les résultats bénéfiques, pour l'homme et pour l'animal, et de toutes les souffrances, de l'homme et de l'animal, liés à cette expérience. Il admettait que la vie humaine a une valeur bien supérieure à celle des animaux, qui n'ont pas conscience de leur existence. Mais on devrait respecter les animaux comme on respecte les enfants gravement handicapés, par exemple. Ignorer les droits d'un animal simplement parce qu'il n'est pas un homme serait une sorte de «racisme d'espèce». En raison de la parenté entre l'homme et les grands singes, plusieurs philosophes demandèrent qu'on ne pratique plus d'expériences sur eux.

Beaucoup de philosophes ont soutenu les animaux, peu ont aidé les biologistes. Parmi ces derniers, certains prétendent qu'on ne peut reconnaître de droits aux animaux parce qu'ils n'ont ni désirs, ni croyances, ni langage. De surcroît, les droits ne sont pas inhérents, ils résultent de contrats implicites entre les membres d'une société et sous-entendent certains devoirs. Comme les animaux ne pratiquent pas cette obligation de devoirs, ils ne peuvent avoir de droits. À cet argument, on lui a opposé que les enfants et les handicapés mentaux ne peuvent pas non plus s'acquitter pleinement de leurs obligations, mais qu'ils n'en ont pas moins des droits : pour-

quoi exclure les animaux? La discussion est interminable : on pourrait alors répondre que les droits de l'homme sont définis pour la majorité des hommes et non pas pour quelques cas limites, mais les défenseurs des animaux demanderaient pourquoi cette distinction, etc.

Les défenseurs de l'expérimentation animale observent que la nature est cruelle : les lions tuent les zèbres, les chats jouent avec les souris. L'évolution a placé l'homme au sommet de cette chaîne, et il peut utiliser les autres créatures. Cet argument consiste à élever le principe de «la survie du mieux adapté» au rang d'une philosophie. De nombreux philosophes expriment des positions intermédiaires : les droits seraient classés selon une hiérarchie qui admettrait l'utilisation de certains animaux seulement. L'ensemble de ces réflexions sur le statut des animaux a déjà modifié la pratique de la biologie. Ainsi, au Royaume-Uni, en Australie et en Allemagne, notamment, la loi exige une étude prévisionnelle des coûts et des bénéfices liés aux expérimentations animales avant de les autoriser. Au mois de novembre 1996, le Parlement néerlandais a voté une loi qui stipule que les animaux ont «une valeur intrinsèque», qu'ils ont des sensations, et qu'ils ont droit aux mêmes préoccupations d'ordre moral que les hommes.

Le public

Le mouvement en faveur des animaux s'est développé en même temps que la société s'éloignait de la nature et oubliait d'où vient ce qu'elle mange. Les éleveurs considèrent les animaux comme des objets, tandis que les citadins qui ont des animaux familiers sont plus sentimentaux. Les hommes et les femmes ont souvent des positions

opposées : dans tous les pays, les femmes prennent davantage position contre l'expérimentation animale.

Au total, le public semble de moins en moins favorable aux expérimentations animales. En 1985, 63 pour cent des Américains interrogés au cours d'une enquête estimaient que «les scientifiques peuvent faire sur des animaux (des chiens ou des chimpanzés, par exemple) des expériences douloureuses, à la condition expresse qu'elles fournissent des informations nouvelles sur la physiologie humaine» ; en 1995, ils n'étaient plus que 53 pour cent.

On a souvent affirmé que les adversaires des expérimentations animales n'étaient pas assez scientifiques. Pourtant, en France, en Belgique et en Italie, par exemple, le rejet de l'expérimentation animale semble d'autant plus marqué que le niveau des connaissances scientifiques est plus élevé.

Selon les sociologues, l'opposition à l'expérimentation animale vient de la sympathie que l'on éprouve envers les animaux. Presque tous les défenseurs des droits des animaux sont végétariens, beaucoup même ne consomment aucun produit d'origine animale. Ils cherchent souvent à minimiser la souffrance qui pourrait leur être imputée, s'imposant par là même une lourde charge morale. Quelques extrémistes ont libéré des animaux après s'être introduits par effraction dans les laboratoires ou ont menacé la vie des biologistes, mais ces actions illégales semblent aujourd'hui plus rares que naguère.

Les scientifiques

Nombre d'expérimentateurs aiment autant les animaux que le reste de la population (les groupes qui accordent le moins de valeur aux animaux sont les fermiers, les chasseurs et le

1885
Louis Pasteur
(à la droite
du patient)
fabrique
le premier
vaccin contre
la rage



1891
Production d'une antitoxine contre la diphtérie
(le sérum est prélevé sur un cheval)

Découverte d'une antitoxine
contre le tétanos



clergé). Presque tous les toxicologues et les pharmacologues pratiquent l'expérimentation animale quand ils pensent que c'est le seul moyen de faire progresser les connaissances et, de cette façon, d'aider l'homme, mais ils cherchent tous des méthodes qui éviteraient d'y recourir.

Bien sûr, la façon dont les scientifiques perçoivent les animaux a également évolué. La sensibilité darwinienne fut d'abord balayée par le behaviorisme : si l'on ne sait pas quantifier les pensées, les comportements sont analysables ; aussi certains expérimentateurs ont-ils cherché à décrire les animaux uniquement en fonction de leurs réactions à des stimulus, à quantifier leurs actions tout en gommant l'aspect psychologique. En pratique, un rat n'est pas censé éprouver de douleur, même quand on évalue l'efficacité d'un analgésique d'après le nombre de ses contorsions ! S'il se tord, ce n'est pas de douleur, c'est seulement que ses circuits neurochimiques déclenchent un réflexe physiologique.

Pendant longtemps, on a considéré que les animaux ne ressentaient rien et qu'il valait mieux pour les chercheurs qu'ils n'éprouvent pas de pitié pour l'animal étudié, car les émotions risquent de fausser leur jugement. Après avoir été attristés par la mort d'un chien ou celle de leur animal favori, les chercheurs et les techniciens apprennent à éviter toute relation affective avec un animal de laboratoire.

Cette distanciation, qui ressemble à celle d'un chirurgien vis-à-vis de son patient, permet aux chercheurs de diminuer leur stress. Toutefois, elle ne doit pas leur faire totalement oublier la souffrance de l'animal. Aujourd'hui, de nombreux expérimentateurs cherchent des indices objectifs de détresse et tentent d'atteindre leurs objectifs

scientifiques tout en minimisant la souffrance des animaux.

Les scientifiques se préoccupent véritablement des animaux de laboratoire depuis la fin des années 1950, quand le zoologiste britannique William Russell et son collègue microbiologiste Rex Burch publièrent les trois objectifs que tout chercheur scrupuleux doit s'imposer : remplacer l'expérimentation animale par des tests *in vitro* ; réduire leur nombre en utilisant des méthodes statistiques ; améliorer le protocole expérimental pour diminuer la souffrance des animaux. Bien que ces principes n'aient pas été connus immédiatement, ils sont aujourd'hui au cœur de la recherche des méthodes alternatives.

Cette recherche a commencé au début des années 1960, et les investissements consentis ont souvent été notables. Au cours des 15 dernières années, l'Allemagne a consacré environ 30 millions de francs par an à ces recherches, les Pays-Bas 10 millions par an. Le Centre européen pour la validation de méthodes alternatives, créé en 1992 par la Commission européenne, a un budget annuel de 45 millions de francs. Les efforts consentis par les États-Unis sont inférieurs ; l'Institut pour l'étude de l'impact de l'environnement sur la santé alloue environ sept millions de francs par an, pour une période de trois ans, et les industries versent cinq millions de francs par an.

Tous ces efforts ont abouti à une réduction du nombre des animaux utilisés. Une meilleure utilisation des méthodes statistiques évite désormais de tester la toxicité aiguë des produits sur l'animal. Pour réaliser le test de la «dose létale 50 pour cent», c'est-à-dire pour déterminer la dose de produit qui tuait la moitié des animaux testés, on utilisait naguère 200 rats,

chiens ou autres animaux, à qui l'on administrait différentes quantités du produit. Bien que l'on ne dispose pas encore de méthodes de remplacement *in vitro* pour tester la toxicité, car les mécanismes sont encore mal compris, les protocoles modernes d'évaluation de la toxicité utilisent dix fois moins d'animaux.

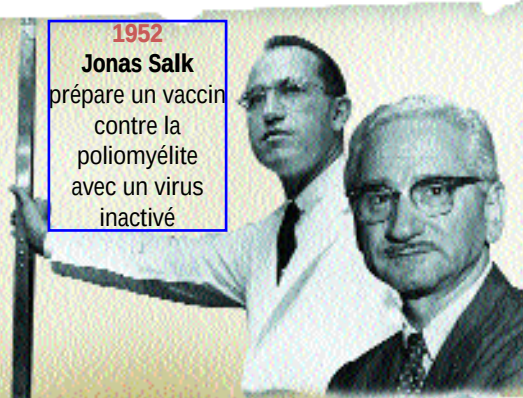
De même, le test de la «dose létale 80», pour les vaccins, consiste à vacciner un groupe d'animaux, puis à exposer le groupe vacciné et un groupe témoin à l'agent de la maladie. Le vaccin n'est validé que si plus de 80 pour cent du groupe vacciné est indemne après l'exposition, tandis que 80 pour cent du groupe témoin meurt. Pour tester les nouveaux vaccins contre la diphtérie et contre le tétanos, on a mis au point un nouveau dosage des anticorps des animaux vaccinés, qui diminue de moitié le nombre d'animaux utilisés ; en outre, ils souffrent moins.

L'examen minutieux des données accumulées évite aussi des expérimentations animales. Horst Spielmann, du Centre allemand des alternatives aux expérimentations animales, a analysé d'innombrables données industrielles sur les pesticides et en a conclu que, si des rats et des souris étaient sensibles à une substance chimique, il était inutile de la tester sur des chiens. Près de 70 pour cent des tests sur les chiens devraient ainsi être évités.

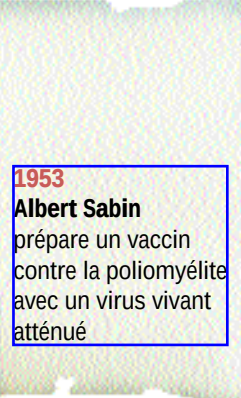
En 1989, après avoir observé la souffrance des souris cancéreuses à qui l'on fait produire des anticorps monoclonaux, le Centre allemand finança des recherches industrielles pour la mise au point de méthodes de production *in vitro*. Depuis, en Europe, les anticorps utilisés pour le traitement des cancers humains ne sont plus guère fabriqués par des souris (contrairement à ce qui se passe aux États-Unis).



1951
Christine Stevens
fonde l'Institut
pour le bien-être
des animaux,
aux États-Unis



1952
Jonas Salk
prépare un vaccin
contre la
poliomyélite
avec un virus
inactivé



1953
Albert Sabin
prépare un vaccin
contre la poliomyélite
avec un virus vivant
atténué

La fabrication du vaccin contre la poliomyélite a également été modifiée. Dans les années 1970, les Pays-Bas utilisaient 5 000 singes par an ; aujourd'hui, des cultures de cellules rénales prélevées sur une dizaine de singes fournissent assez de vaccins. De surcroît, les hormones et les vaccins sont plus purs quand ils sont issus de cultures cellulaires que lorsqu'ils pro-

viennent d'animaux vivants ; il n'est plus nécessaire de vérifier l'innocuité et l'efficacité de chaque lot.

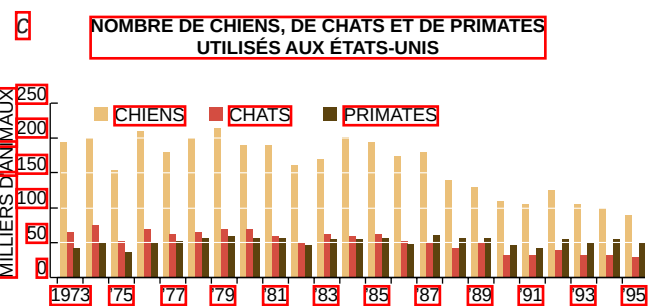
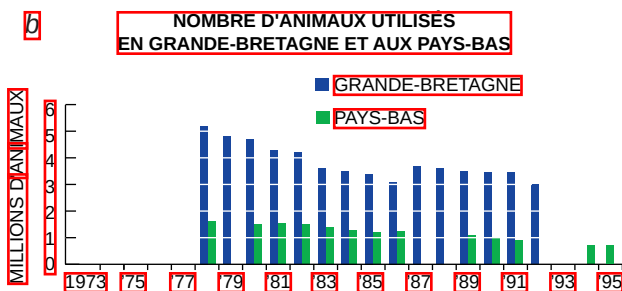
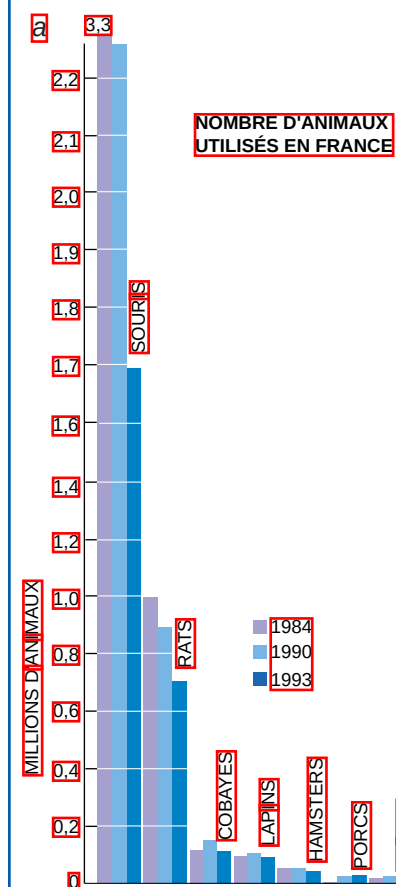
La mise au point de peaux artificielles permet également d'éviter des expériences douloureuses sur l'animal. Pour étudier la pénétration des cosmétiques dans la peau, on rasait le dos d'un lapin, on y déposait le produit testé, et l'on en observait la pénétra-

tion. Les tests de substitution utilisent de la peau humaine reconstituée ou des biomembranes. Aussi plusieurs fabricants de cosmétiques ont-ils complètement abandonné les tests sur animaux. Toutefois, la biologie ne pourra sans doute pas se passer complètement d'animaux. Quand l'expérimentation animale s'impose, les chercheurs tentent de réduire le nombre des animaux

Les effectifs des animaux consacrés à la recherche

Le nombre des animaux utilisés dans les laboratoires européens a lentement diminué (a et b). Aux Etats-Unis, les données dis-

ponibles concernent les primates, les chiens, les chats, les cochons d'Inde, les lapins, les hamsters notamment, mais excluent les rats, les souris et les oiseaux, qui représentent pourtant chaque année environ 17 millions d'animaux. Le nombre de primates reste à peu près constant, tandis que celui des chats et des chiens (c) diminue (depuis 1990, les chiens sont progressivement remplacés par des porcs, des veaux ou d'autres animaux de ferme, mais ils ne figurent pas sur ce graphique).



1992
Création du Centre européen pour la validation des méthodes alternatives

1993
Premier congrès mondial sur les méthodes alternatives



1996
Deuxième congrès mondial sur les méthodes alternatives, à Utrecht, aux Pays-Bas

France Culture et Pour la Science

**vous invitent
au Palais
de la Découverte
à l'enregistrement**

des Inattendus de la science

**Samedi
12 avril 1997
à 15h**

*Les inattendus
de la biologie
du développement*
avec Alain Prochiantz,
directeur de recherche
au CNRS

**Invitations à demander
au 08 36 68 10 99 (2,23F/mn)**



Palais de la découverte

**POUR LA
SCIENCE**

utilisés ou de choisir des animaux phylogénétiquement inférieurs.

L'enseignement également a évolué : ainsi, les chirurgiens britanniques ne s'entraînent plus sur des animaux, mais sur des cadavres humains ; ensuite ils assistent des chirurgiens expérimentés pendant des opérations réelles. Aux États-Unis, les étudiants de plus de 40 facultés de médecine sur 126 n'utilisent pas d'animaux au cours de leur cursus universitaire.

L'état d'esprit des chercheurs a changé. Depuis 1985, aux Pays-Bas, tous les scientifiques qui s'apprentent à faire des expérimentations animales doivent suivre un stage de trois semaines, où ils apprennent comment manipuler les animaux, comment pratiquer des anesthésies, et quelles sont les règles élémentaires de l'expérimentation animale. Au cours de leurs études, on demande aux étudiants en médecine de concevoir une expérimentation animale pour résoudre des problèmes précis, puis de trouver d'autres méthodes qui donneraient les mêmes résultats, sans avoir recours aux animaux.

Si l'état d'esprit évolue, c'est sans doute aussi parce que les lois elles-mêmes ont changé, introduisant la clause du « bien-être » de l'animal. Aujourd'hui, on admet que les primates éprouvent des émotions, et l'on a dressé la liste des situations qui doivent être évitées : la peur, l'anxiété, l'ennui et l'isolement. Des statistiques sur la douleur et la détresse des animaux ont été établies, mais elles sont parfois contestées. En 1995, 54 pour cent des animaux recensés au cours d'enquêtes menées aux États-Unis ne semblaient éprouver ni douleur ni détresse, 37 pour cent souffraient de douleur soulagée par des antalgiques, et seulement neuf pour cent souffraient de douleur ou de détresse non soulagée. Ces données sont controversées, car aucune classification de la douleur n'a été définie. Des tests dont on admet souvent qu'ils sont douloureux, tels les tests de toxi-

cité ou la fabrication d'anticorps, y ont été classés dans la catégorie des manipulations indolores.

L'évaluation de la détresse animale est effectivement difficile. Plusieurs pays européens, ainsi que le Canada et l'Australie, ont défini des échelles de douleur où chaque expérimentation a un indice de douleur. En 1995, les Pays-Bas ont établi que 54 pour cent des animaux éprouvent une gêne mineure, 26 pour cent une gêne modérée et 20 pour cent souffrent d'une grave détresse au cours des expériences pratiquées.

Les changements ont été lents. Les activistes les plus actifs prétendent que la recherche animale est inutile, que les expérimentateurs sont cruels, corrompus, et entraînés dans une course aux publications et aux subventions. Inversement, les partisans de l'expérimentation considèrent que l'on ne peut sacrifier l'homme à la cause animale, et qu'un renforcement des droits des animaux menacerait la santé publique.

Les spécialistes des sciences de la vie semblent avoir évolué plus vite en Europe qu'aux États-Unis. Les Européens qui s'intéressent aux primates, par exemple, discutent depuis des dizaines d'années des sentiments complexes qu'éprouvent ces animaux. L'Union européenne projette de diviser par deux le nombre des animaux utilisés d'ici l'an 2000 (au contraire, aux États-Unis, ce nombre ne décroîtra probablement pas).

Aujourd'hui, les défenseurs des animaux doivent accepter que la recherche animale est utile à l'homme et, de leur côté, les partisans de la recherche animale doivent admettre que, si les animaux sont suffisamment proches de l'homme pour que leur corps ou leur cerveau servent de modèles pour la physiologie humaine, leur utilisation pose inévitablement des questions éthiques. Les recherches sur les invertébrés, les études *in vitro* et les simulations informatiques sont des méthodes de remplacement à l'étude.

Madhusree MUKERJEE est journaliste à *Scientific American*.

F. Barbara ORLANS, *In the Name of Science: Issues in Responsible Animal Experimentation*, Oxford University Press, 1993.

Deborah BLUM, *The Monkey Wars*, Oxford University Press, 1994.

Andrew N. ROWAN, Franklin M. LOEW et Joan C. WEER, *The Animal Research Controversy: Protest, Process and Public Policy*, Center for Animals and Public Policy, Tufts University School of Veterinary Medicine, 1995.

D'autres informations sont disponibles sur le site Web : <http://www.sciam.com>

L'interférométrie radar par satellite

DIDIER MASSONNET

Des radars en orbite à des centaines de kilomètres de la Terre détectent de faibles mouvements de sa surface.

Les plaques tectoniques glissent silencieusement les unes contre les autres ; les glaciers descendent lentement des montagnes ; le niveau du sol s'élève et s'abaisse doucement... Généralement les forces qui façonnent la Terre agissent si lentement que nous n'en percevons pas les conséquences. Toutefois, la rupture soudaine des failles géologiques ou l'éruption explosive des volcans nous rappellent que la Terre «ferme» est en réalité mouvante.

Pour mieux comprendre la dynamique du Globe et prévoir de telles catastrophes, les géophysiciens mesurent les étirements et les flexions de la croûte terrestre. À cette fin, ils installent divers instruments, niveaux géodésiques ou balises électroniques de positionnement, sur les failles et sur les volcans. Toutes les zones du Globe ne sont toutefois pas facilement accessibles, et la mesure des déformations de grandes portions de la croûte terrestre est longue à réaliser par ces méthodes.

Les géologues pourraient-ils suivre les déformations du sol sans se déplacer ? En 1985, j'ai proposé d'utiliser pour cela des images enregistrées par des satellites, en perfectionnant l'interférométrie des images radar. À cette époque, on savait déjà observer la surface terrestre à l'aide d'avions et de satellites ; je me suis alors demandé comment on pourrait traiter les informations ainsi recueillies pour détecter les faibles déformations de la surface de la Terre. Toutefois, les quelques géologues auxquels j'avais fait part de ce projet étaient sceptiques : détecter des mouvements de quelques millimètres avec un satellite placé à

des centaines de kilomètres d'altitude semblait impossible.

En revanche, je parvins à convaincre le Centre national d'études spatiales et, après une dizaine d'années d'études, nous utilisons aujourd'hui notre nouvelle technique pour cartographier les ruptures de failles géologiques lors de tremblements de terre et pour suivre les soubresauts des volcans causés par les flux et les reflux du magma situé en dessous. D'autres équipes ont observé de la même façon des glissements de terrain et l'écoulement lent des glaciers.

De précieuses interférences

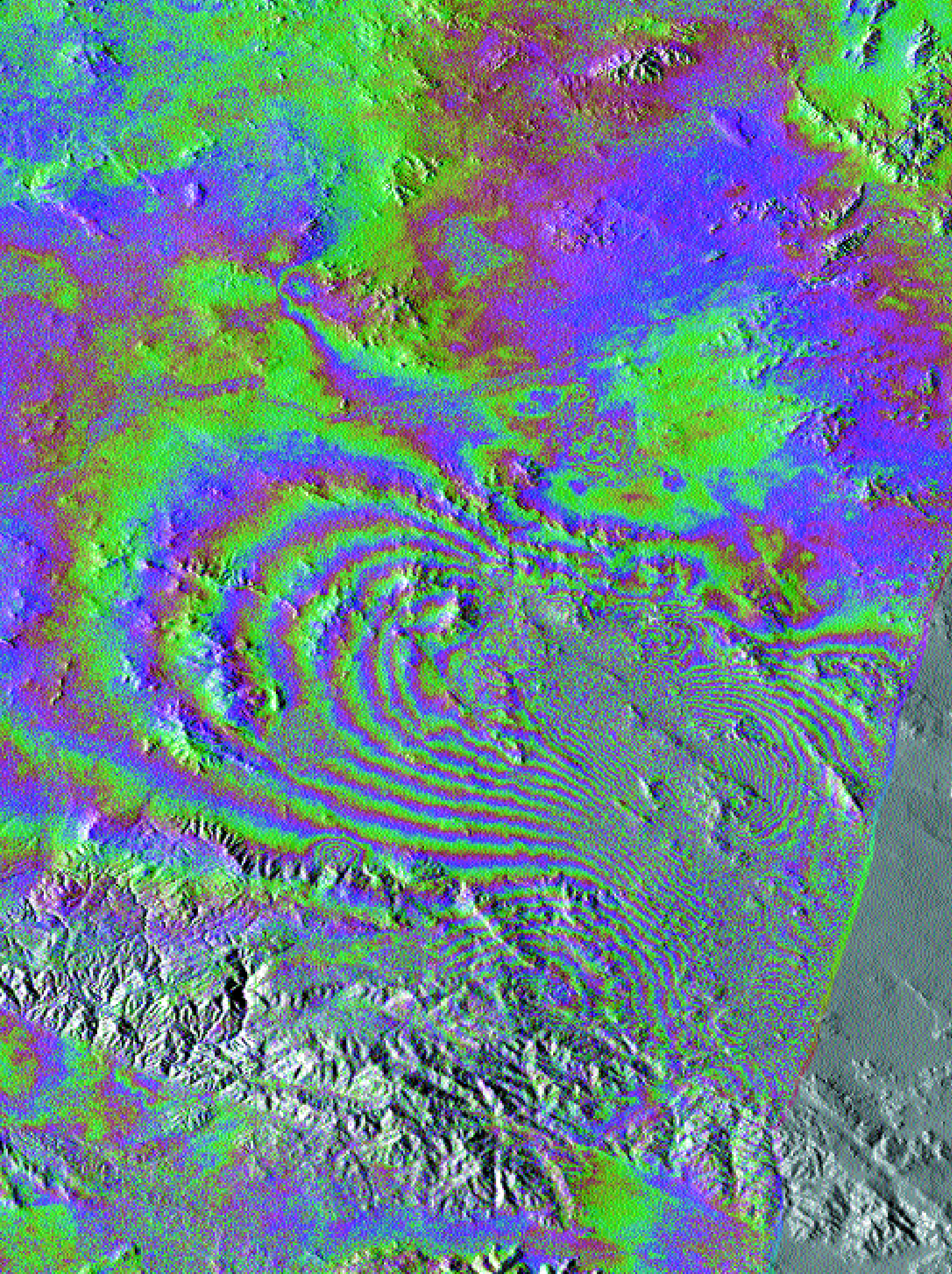
Le radar est l'instrument de détection utilisé dans cette technique. Inventé dans les années 1940, son nom est l'acronyme anglais de «détection et mesure de distance par radio». Nous connaissons tous les grandes antennes tournantes qui suivent les avions dans le ciel ; moins visibles sont les petites antennes fixes embarquées sur des avions, qui forment des images du sol de nuit comme de jour, par beau temps ou dans le brouillard le plus épais : le radar détecte les réflexions d'ondes électromagnétiques qu'il a lui-même émises, de sorte que la lumière du jour ne lui sert pas. Une couche nuageuse, même épaisse, n'empêche pas l'observation, car les gouttelettes d'eau et les microcristaux

de glace n'arrêtent pas les ondes radio utilisées par le radar.

L'imagerie par radar a encore un autre avantage sur la photographie optique. Les instruments optiques captent en effet la lumière réfléchie par le sol sous la forme d'innombrables ondes électromagnétiques de toutes fréquences et de toutes phases ; chaque point de l'image, ou pixel, est caractérisé par la brillance de la lumière détectée. En revanche, un radar envoie sur sa cible une onde radio de fréquence précise, qui oscille comme une sinusoïde en fonction du temps, et il mesure, pour chaque pixel, la phase de l'onde réfléchie.

Grâce aux courtes longueurs d'onde employées, la mesure de la phase révèle à quelle distance se trouve une cible au centimètre près, voire à quelques millimètres près. Quand un radar embarqué sur un satellite émet, à une fréquence de l'ordre de six gigahertz (six milliards de cycles par seconde), par exemple, l'onde radio parcourt, à la vitesse de la lumière, cinq centimètres pendant chaque oscillation. Si la distance qui sépare l'antenne radar d'une cible est de 800 kilomètres, les 1 600 kilomètres que parcourt l'onde pour aller jusqu'à la cible et revenir au radar correspondent à un nombre très grand, mais entier, de longueurs d'onde. Dans ce cas, lorsque l'onde revient au satellite, elle a juste terminé son dernier cycle, et sa phase est la

1. LES FRANGES D'INTERFERENCES (bandes colorées sur l'image de droite) calculées à partir de deux prises de vue radar successives du satellite ERS-1 (ci-dessus, à gauche) montrent la déformation du sol causée par un séisme près de la ville de Landers, en Californie, en 1992. Chaque cycle de couleur (du rouge au bleu) représente un déplacement du sol de 28 millimètres vers le satellite. Pour observer uniquement les déformations du sol, on a soustrait de l'interférogramme les signaux dus au relief (représenté sur le fond en noir et blanc).



même que lors de l'émission. En revanche, si la cible est à 800 kilomètres et un centimètre du radar, l'onde parcourt deux centimètres supplémentaires pour effectuer le trajet aller et retour, soit 40 pour cent de la longueur d'onde. La phase de l'onde réfléchie est alors de 40 pour cent de sa valeur sur un cycle lorsqu'elle revient au

radar. Ce dernier peut mesurer un tel écart, et des écarts encore inférieurs.

Pendant des décennies, les spécialistes du radar ne se préoccupèrent toutefois pas de la phase de l'onde réfléchie, parce que chaque pixel d'une image radar prise d'un avion ou d'un satellite correspond à une surface au sol de 100 mètres carrés environ. L'onde

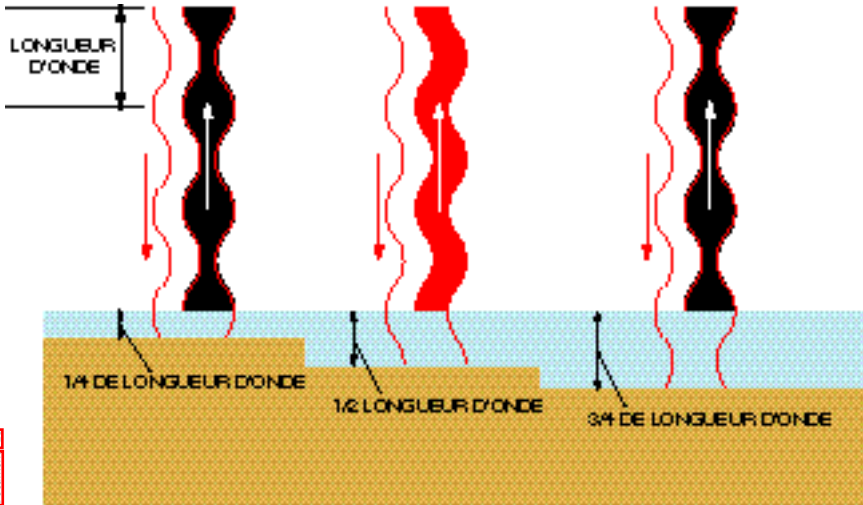
réfléchi par cette surface est la combinaison des ondes réfléchies par toutes les cibles élémentaires qu'elle contient, cailloux, rochers, branches, feuilles et, plus généralement, tout objet présentant des aspérités. Comme toutes ces réflexions se combinent de manière imprévisible, la phase pour un pixel donné est aléatoire : elle semble n'avoir aucun lien avec la phase mesurée sur les pixels voisins.

L'amplitude du signal associé à un pixel, dans une telle image, indique donc si un nombre plus ou moins grand de réflecteurs élémentaires se trouvent à l'endroit correspondant au sol. Toutefois, l'amplitude mesurée est «bruitée», parce que les réflexions élémentaires qui se combinent en chaque pixel peuvent renforcer la brillance totale, par interférence constructive, ou s'annuler mutuellement, par interférence destructive. Ce phénomène de scintillement explique aussi l'aspect granuleux des points éclairés par les lasers.

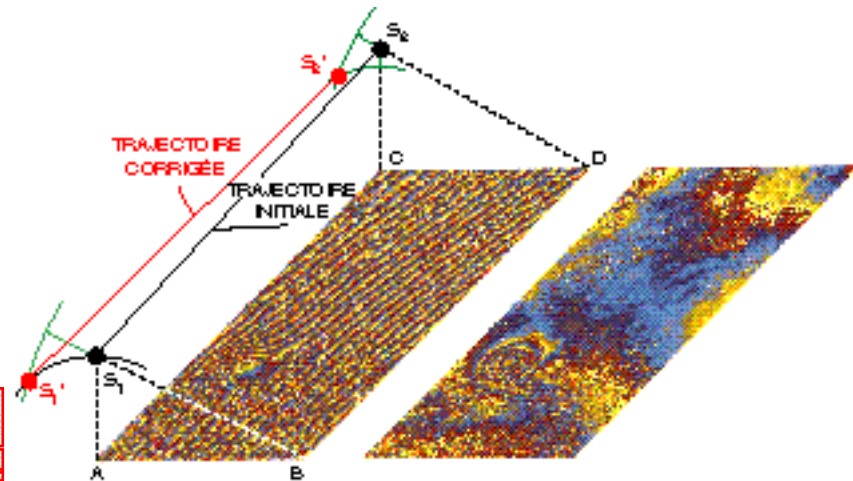
Le scintillement des images radar est atténué par le calcul de la moyenne des amplitudes des pixels voisins. Cette opération est faite au détriment de la précision des images. Celles-ci ressemblent ainsi davantage aux photographies aériennes en noir et blanc. Toute information sur la phase des pixels a toutefois disparu.

Les richesses de la phase

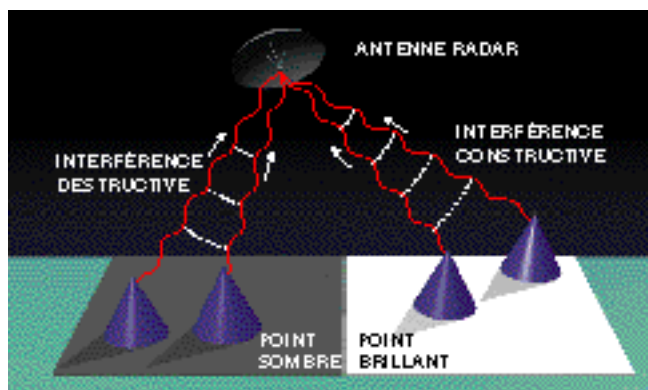
Le premier qui parvint à utiliser cette information fut L.C. Graham, de la Société Goodyear Aerospace : en 1974, il démontra que l'on peut mesurer la topographie du terrain à l'aide des phases mesurées par un radar aéroporté, équipé de deux antennes. Puis, dans les années 1980, une équipe du Laboratoire de propulsion de Pasadena (Californie), obtint des résultats similaires à partir des mesures de phase du satellite SEASAT, premier satellite radar civil, lancé en 1978 (qui ne fonctionna malheureusement que trois mois). L'équipe californienne comparait deux images radar d'une même zone, prises de positions différentes et à des instants différents. Bien que la phase de chaque pixel semble aléatoire à chaque prise de vue, la différence des phases des pixels correspondants sur les deux images ne l'est pas : en codant cette différence de phase avec des couleurs, on obtient une figure d'interférences équivalant à des courbes de niveau.



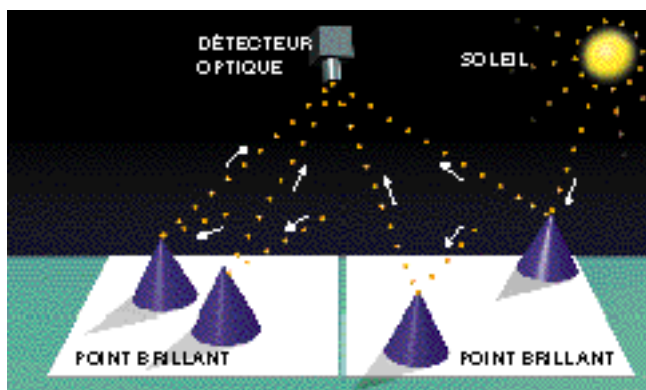
2. LES ONDES RÉFLÉCHIES par les deux faces d'une lame de verre interfèrent différemment selon l'épaisseur de la lame. L'onde réfléchie par la face inférieure parcourt une distance supplémentaire égale au double de cette épaisseur. Lorsque cette dernière est un multiple entier de la demi-longueur d'onde (au milieu), la distance supplémentaire est un nombre entier de longueurs d'onde : les deux ondes sont en phase, et l'on observe une tache lumineuse. Au contraire, lorsque l'épaisseur de la lame est un multiple demi-entier de la demi-longueur d'onde, la distance supplémentaire est égale à un nombre entier de demi-longueurs d'onde (à gauche et à droite) : les deux ondes sont déphasées, et l'on observe une tache sombre.



3. L'ÉCART ENTRE LES DEUX ORBITES d'où sont prises les deux images radar que l'on combine pour obtenir un interférogramme produit des franges d'interférence (à gauche). Pour éliminer ces franges, qui masquent les informations sur le déplacement du sol, on les calcule à partir des données sur la trajectoire du satellite. Celle-ci n'est toutefois pas connue au centimètre près : il reste donc des franges «orbitales» non modélisées. On les retire en «réglant» l'une des orbites selon le principe suivant : sur l'image de gauche, on compte 15 franges du point A au point B ; la distance entre le satellite S_1 et B doit donc être allongée de 15 fois une demi-longueur d'onde. Si la distance entre A et S_1 est prise comme référence, la position corrigée du satellite est trouvée à l'intersection des cercles noir et vert. En gardant A comme référence, on trouve que la distance DS_2 devrait être allongée de sept demi-longueurs d'onde et la distance CS_2 raccourcie de cinq demi-longueurs d'onde, ce qui donne la nouvelle position S_2' du satellite de l'autre côté de l'image. La trajectoire corrigée S_1S_2' permet de retirer les franges «orbitales» partout (à droite). On observe alors les phénomènes sous-jacents, tel un petit tremblement de terre (en bas de l'image).



4. LES ÉCHOS RADAR (*lignes rouges*) d'un couple d'objets proches peuvent interférer de façon constructive (à droite) ou destructive (à gauche). Des différences minimales dans la disposition des objets peuvent donc modifier considérablement la brillance d'un point d'une image radar.

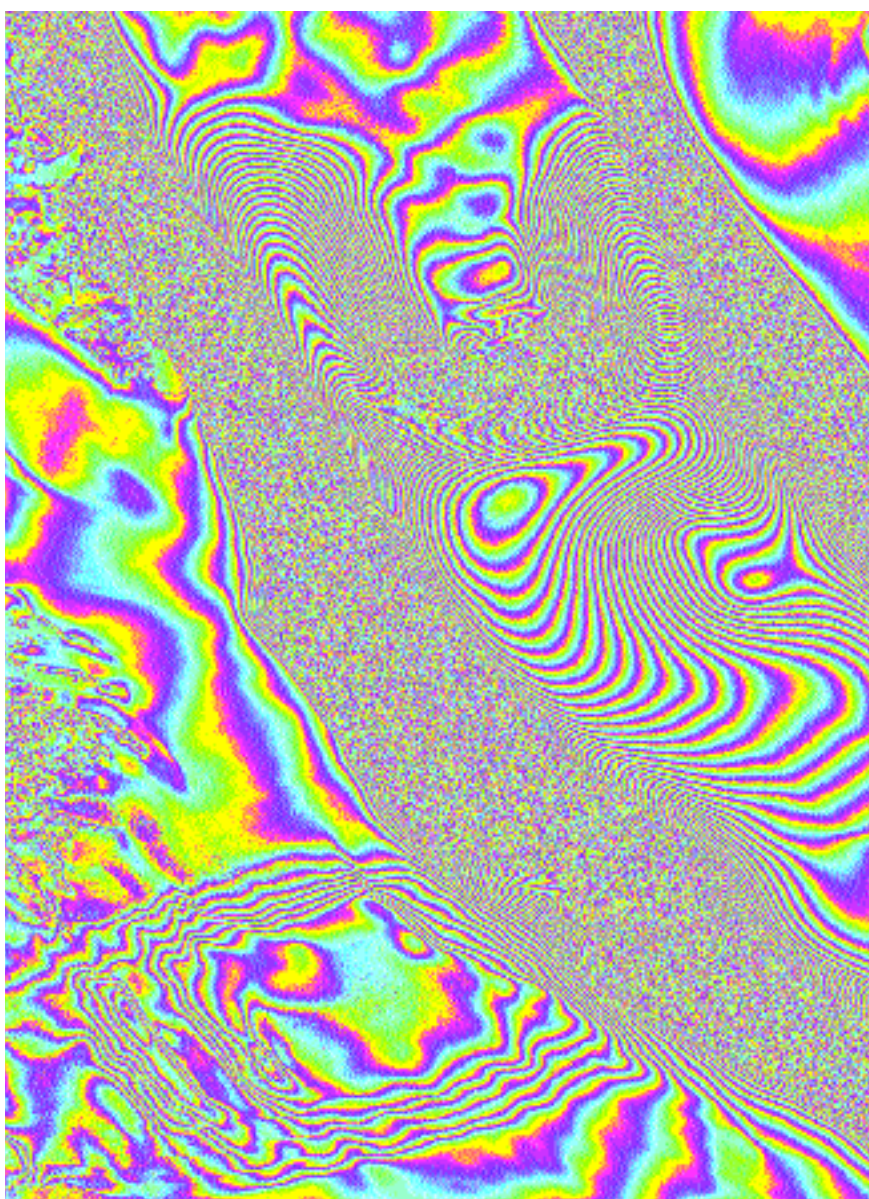


5. UN COUPLE D'OBJETS réfléchit toujours à peu près le même nombre de photons vers l'instrument, quelle que soit la position de ces objets dans la surface observée. La luminosité de celle-ci ne varie donc pas lorsque les objets sont légèrement déplacés.

Pour suivre des mouvements de la croûte terrestre, nous avons appliqué la même méthode, mais en éliminant toutes les conséquences du décalage de la position du satellite entre les deux prises de vue. Dans ces conditions, si le sol n'a pas bougé entre temps, la phase de chaque pixel devrait être identique sur les deux images. En revanche, si le paysage a changé, même faiblement, entre les prises de vue, la phase de certains pixels est modifiée. Le calcul de la différence de phase produit une figure d'interférences.

Les «interférogrammes» radar sont des images formées par l'attribution de couleurs, du rouge au bleu, aux différentes valeurs de la différence de phase. Les distances au radar de deux points situés sur deux franges de la même couleur et séparées par un seul cycle de couleurs ont varié d'une demi-longueur d'onde (on divise par deux, car l'onde parcourt la distance additionnelle à l'aller et au retour) l'une par rapport à l'autre entre les deux prises de vue. Pour les images prises avec le satellite européen ERS-1, cette différence est égale à 2,8 centimètres. Bien que les franges n'indiquent que les déplacements du sol perpendiculairement à la ligne de visée du satellite, ces images donnent des informations sur des étendues telles (typiquement 100 kilomètres par 100 kilomètres) qu'il faudrait des années de travail à des géologues pour obtenir le même résultat par des mesures de terrain.

Les deux images que nous combinons pour former un interférogramme sont prises à des instants différents, à partir de positions diffé-



6. LA GLACE située en bordure de l'Antarctique s'écoule dans la mer en suivant le lit d'une sorte de «fleuve de glace». Ce déplacement, qui suit la marée, est montré ici par la combinaison de deux images du satellite radar ERS-1. Deux bandes parallèles de glace fortement cisailée (les zones où les franges ne sont plus lisibles) marquent les bords de l'écoulement.

rentes. Ces variations spatiales et temporelles fournissent des informations spécifiques et imposent aussi des limites à la méthode : pour n'observer que les mouvements du sol, nous devons éliminer tous les phénomènes qui ajoutent des franges d'interférences ou modifient celles-ci.

L'écart temporel introduit une première contrainte. Si les nombreuses petites cibles réfléchissantes qui composent chaque pixel, rochers ou végétation, changent entre les deux prises de vue, la composante aléatoire de la phase varie pour chaque image. Si le temps écoulé entre les deux images est trop long, ces petites cibles varient au hasard : les feuilles tombent des arbres, de l'herbe pousse là où il n'y avait rien, des orages lessivent le terrain.

Ensuite, les deux images radar sont prises à partir de positions différentes : une partie de la différence de phase de chaque pixel provient donc du relief du sol, comme sur n'importe quel couple d'images stéréoscopiques. On soustrait cette contribution à l'interférogramme si l'on dispose d'informations précises sur la topographie.

Enfin, le changement de position du satellite entre les deux images modifie l'angle d'incidence de l'onde radar. Pour que les réflexions élémentaires à l'intérieur d'un même pixel se combinent de la même façon, le déphasage dû à cette variation angulaire doit rester inférieur à une fraction de longueur d'onde sur la largeur d'un pixel. En pratique, cette condition est réalisée si l'écart des positions du satellite lors des deux prises de vue est inférieur à un kilomètre. Les quatre satellites radar civils qui fonctionnent aujourd'hui, le *Radarsat* canadien, les satellites européens *ERS-1* et *ERS-2*, ainsi que le satellite japonais *JERS-1* satisfont la plupart du temps à cette exigence de répétition orbitale, bien qu'aucun d'entre eux n'ait été conçu pour faire de l'interférométrie.

Nous avons d'abord tenté d'appliquer notre méthode avec des images prises par un radar aéroporté. Après l'écrasement au décollage de l'avion où nous embarquions habituellement le radar expérimental du CNES, nous avons utilisé le radar et l'avion de l'Institut aérospatial allemand. Ces expériences ont échoué, car l'avion ne parvenait jamais à parcourir des trajectoires successives assez proches

l'une de l'autre : pour un avion, qui vole à une altitude beaucoup plus faible qu'un satellite, l'écart maximal des trajectoires doit être de quelques mètres. Laurence Gray et ses collègues du Centre canadien de télédétection ont toutefois réalisé ce tour de force en 1991.

Un séisme providentiel

L'année suivante, un violent tremblement de terre frappa la région de Landers, une petite ville du Sud de la Californie. Nous avons aussitôt pensé que cet endroit au climat aride serait idéal pour tester notre méthode avec des images du satellite radar *ERS-1*, lancé l'année précédente. Nous avons traité des images radar de la zone

En outre, ce dernier montrait des détails nouveaux, telles de petites discontinuités sur des failles géologiques connues. Par exemple, sur notre interférogramme, à 100 kilomètres de l'épicentre du séisme, on distingue une discontinuité de sept millimètres, située sur une portion de faille de 20 kilomètres de long. Un modèle de propagation des contraintes indiquait justement que cette portion de 20 kilomètres était une zone de contrainte maximale sur la croûte terrestre.

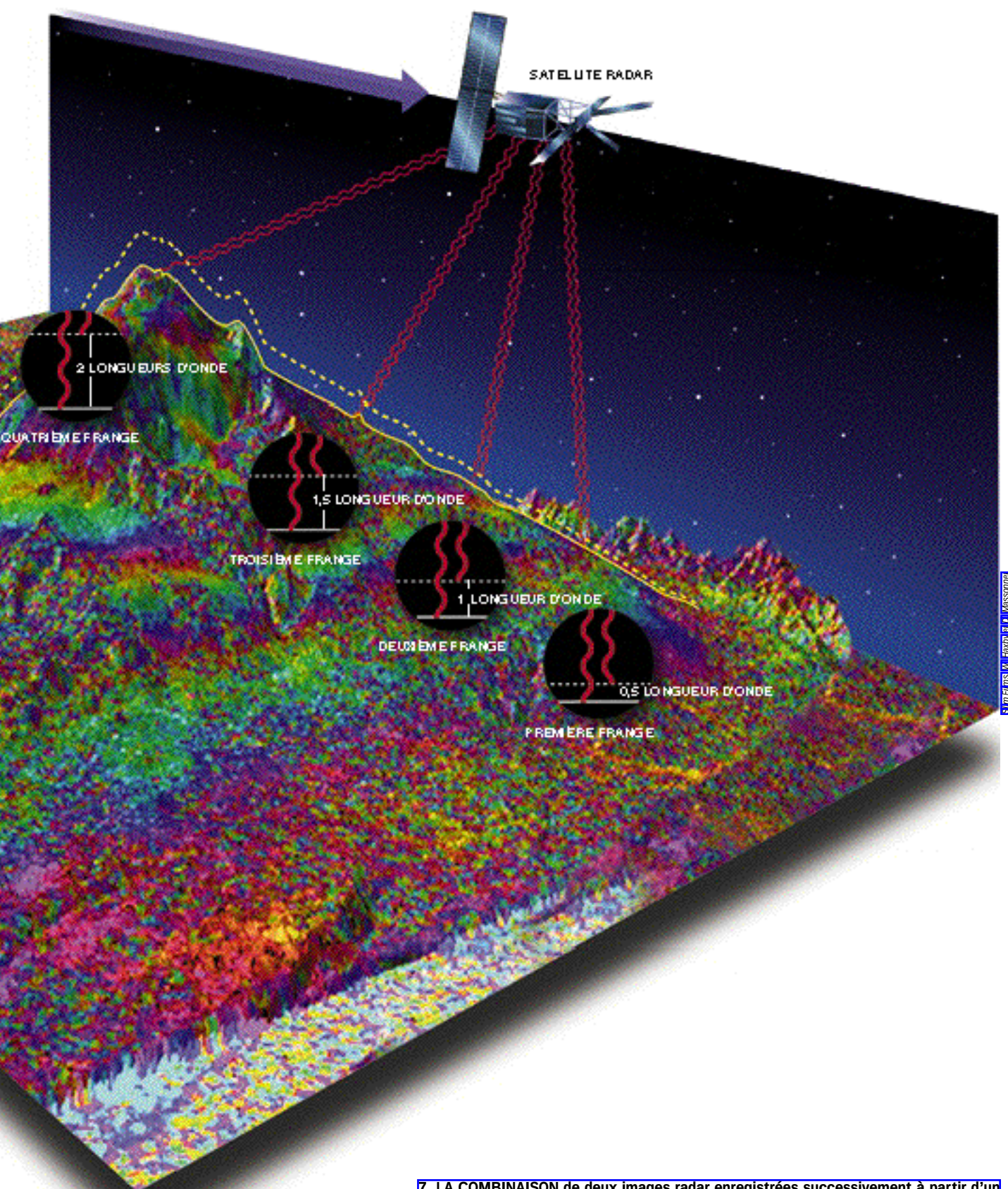
Peu après cette étude, Richard Goldstein et ses collègues de Pasadena ont utilisé l'interférométrie radar pour suivre les mouvements de la glace

et nous avons formé un interférogramme en combinant une image acquise avant le séisme et une image acquise après. Comme les trajectoires étaient légèrement différentes, les franges d'interférences contenaient des informations sur le relief accidenté de la région : en utilisant une carte topographique numérique, nous avons calculé la contribution du relief, et nous l'avons soustraite de l'interférogramme. Une figure d'interférences plus structurée est alors apparue (voir la figure 1).

Ces bandes colorées montraient-elles les déplacements de la surface du désert californien dus au tremblement de terre? Avec nos collègues du Groupe de recherche en géodésie spatiale de Toulouse, nous avons calculé les déformations de la croûte terrestre dans cette région à partir des mesures des déplacements du sol près de la rupture principale. Nous avons alors calculé un interférogramme simulé. Les principales caractéristiques de cet interférogramme ressemblaient étonnamment à celles de l'interférogramme calculé à partir des deux images radar.

En Antarctique. Le satellite *ERS-1* avait pris deux images d'un glacier à six jours d'intervalle, sa position n'étant décalée que de quelques mètres. Les deux images étant acquises presque de la même position, l'interférogramme ne contenait pas de contribution de la topographie : il indiquait seulement les mouvements de la glace. L'image montre un écoulement de glace de deux mètres en six jours, avec des détails sur la géométrie de l'écoulement (voir la figure 6).

Peut-on détecter des déformations d'amplitude inférieure par interférométrie des images radar? Nous avons

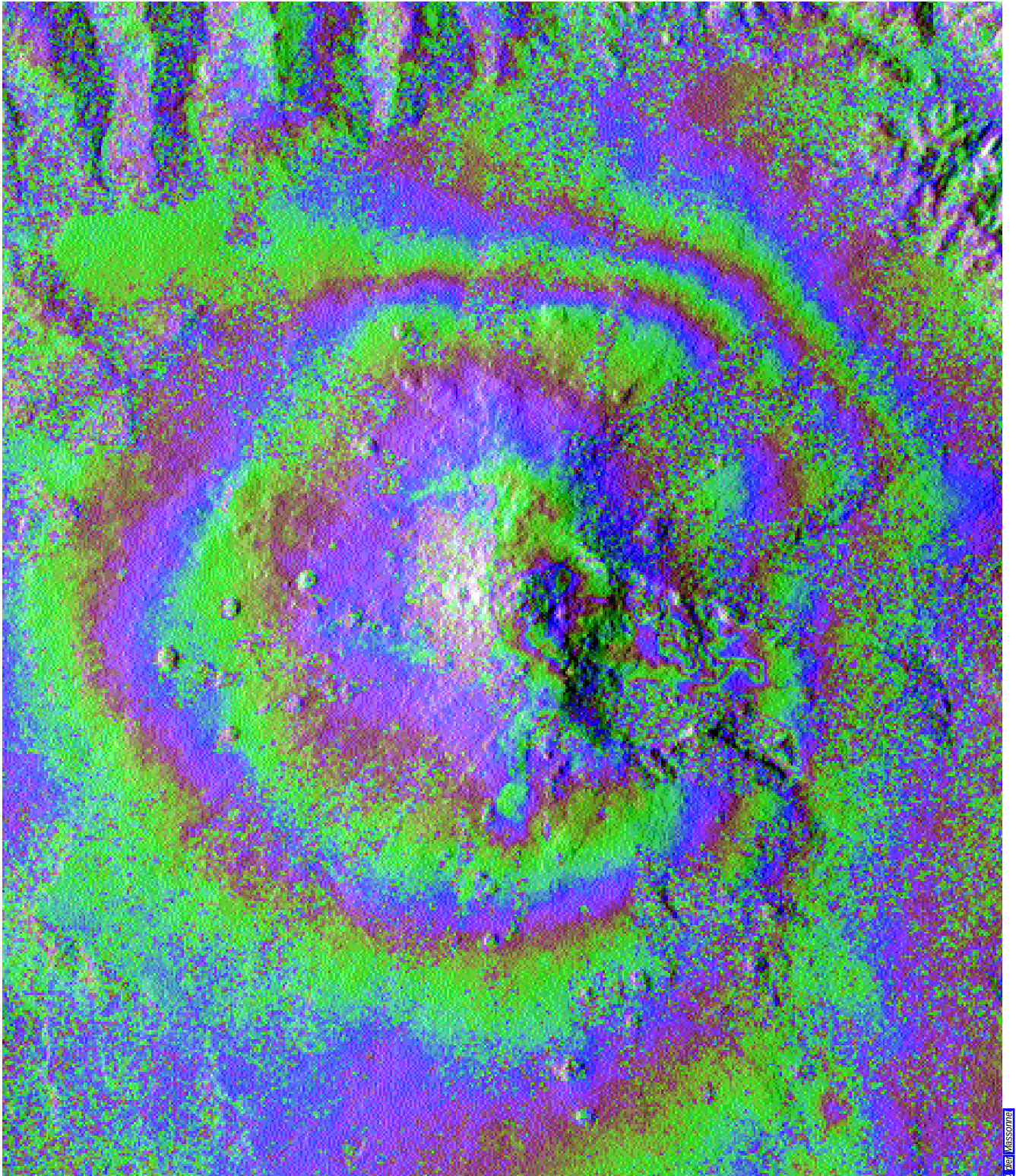


7. LA COMBINAISON de deux images radar enregistrées successivement à partir d'un même point dans l'espace crée une figure d'interférences lorsque la croûte terrestre se déplace : on fait correspondre arbitrairement une couleur à chaque valeur de la différence de phase de chaque pixel entre les deux images. Chaque cycle de couleur, ou frange, correspond à un déplacement du sol d'une demi-longueur d'onde (*cartouches circulaires*), soit une longueur d'onde pour le trajet d'aller et de retour de l'onde radar. La figure d'interférences représentée ici montre un affaissement progressif de l'Etna.

examiné l'Etna alors qu'il approchait de la fin d'un cycle éruptif : pendant une période de 18 mois, le satellite ERS-1 le survola plus de 30 fois. À partir des diverses images radar et d'une carte topographique, nous avons pro-

duit des dizaines d'interférogrammes débarrassés des informations de relief. Certains étaient brouillés par des changements dans la végétation sur les flancs du volcan : des couples d'images utilisés pour construire ces inter-

férogrammes étaient séparés par plusieurs mois, d'autres par plus d'un an. Néanmoins, avec l'aide de nos collègues de l'Institut de physique du Globe de Paris, nous avons suivi le «dégonflement» du volcan à mesure



8. L'ETNA SE DEGONFLE à mesure que le magma sous-jacent est évacué. Cette figure d'interférences produite à partir de données du satellite ERS-1 montre quatre franges d'interférences qui indiquent que le

sommet de la montagne est descendu de 11 centimètres entre les dates de prise de vue des deux images. L'ampleur de la zone qui se déforme a été révélée grâce à la grande superficie observée par le satellite

que les laves finissaient de s'écouler et que la pression diminuait sous la montagne. Nos interférogrammes montrent que le sommet de l'Etna est descendu de deux centimètres par mois pendant les sept derniers mois de l'éruption. La zone de déformation s'étendait assez loin du volcan lui-même : la chambre magmatique souterraine serait beaucoup plus profonde que ne le pensaient les géologues. Ces derniers avaient installé leurs instruments de mesure sur une zone plus petite que celle observée par le satellite : ils n'observaient les phénomènes que près du sommet.

Bien que l'Etna soit situé dans l'une des zones les mieux surveillées au monde par les géologues, l'interférométrie radar a précisé son comportement. On pourrait ainsi étudier les quelques centaines de volcans actifs de la Terre, en utilisant les satellites radar aujourd'hui en orbite. L'interférométrie radar ne remplacera pas les mesures sur le terrain, mais elle pourrait alerter les géologues en révélant les volcans qui se réveillent lentement, lorsqu'ils commencent à gonfler et deviennent dangereux. Elle permettrait aussi de surveiller des volcans d'accès difficile.

L'accumulation des interférogrammes a montré que les évolutions rapides de l'atmosphère et de l'ionosphère contribuent aux franges d'interférences en accélérant et en retardant les ondes radar. Les modifications des propriétés électriques du sol, conséquences de variations de l'humidité par exemple, peuvent aussi modifier les franges d'interférences, même quand le sol ne bouge pas, ce qui complique l'interprétation des résultats de l'interférométrie radar. Nous savons aujourd'hui distinguer leurs contributions de celle des déplacements effectifs du sol, en analysant plusieurs interférogrammes. Nous

envisageons aussi d'étudier ces phénomènes par interférométrie radar.

Quel est l'avenir de l'interférométrie des images radar ? Les quatre satellites radar qui sont aujourd'hui en orbite survolent presque toute la surface du Globe. L'Europe, le Japon et le Canada prévoient de lancer bientôt d'autres satellites, de sorte que nous ne manquerons pas de données radar. Des campagnes de relevés faites à l'aide de satellites capables de répéter presque exactement leur trajectoire, et dont les caractéristiques techniques seraient adaptées à l'interférométrie, simplifieraient beaucoup l'exploitation des données interférométriques pour le calcul des mouvements du sol. De tels satellites serviraient aussi aux relevés topographiques si certaines orbites étaient volontairement décalées pour créer un effet stéréoscopique. La NASA prévoit de mettre en œuvre cette propriété de l'interférométrie en lançant une mission spécifique sur la Navette spatiale vers l'an 2000. La quasi-totalité de la topographie de la planète serait alors connue avec précision.

Les expériences initiales sur le tremblement de terre de Landers et sur l'Etna avaient pour but de valider la technique. Elles ont toutefois apporté des connaissances nouvelles. Les expériences que nous-mêmes et d'autres équipes avons réalisées depuis apportent des informations d'intérêt scientifique, industriel ou juridique plus spécifiques. Par interférométrie des images radar, nous détectons l'affaissement du sol créé par des exploitations minières ou géothermiques profondes, ainsi que les réajustements silencieux des zones sismiques plusieurs mois après un grand tremblement de terre. Cette technique tiendra une place importante et durable parmi les outils d'observation de la Terre.

Didier MASSONNET est responsable adjoint de la division de traitement d'image du Centre national d'études spatiales.

A.K. GABRIEL, R.M. GOLDSTEIN et H.A. ZEBKER, *Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry*, in *Journal of Geophysical Research: Solid Earth and Planets*, vol. 94, n° B7, pp. 9183-9191, 10 juillet 1989.
Sar Geocoding: Data and Systems, sous la direction de G. Schreier, Wichmann, 1993.

D. MASSONNET et al., *The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry*, in *Nature*, vol. 364, pp. 138-142, 8 juillet 1993.

D. EVANS, E. STOFEN, T. JONES et L. GODWIN, *La Terre vue du ciel*, in *Pour la Science*, février 1995.

D. MASSONNET, P. BRIOLE et A. ARNAUD, *Deflation of Mount Etna Monitored by Spaceborne Radar Interferometry*, in *Nature*, vol. 375, pp. 567-570, 15 juin 1995.

L'émergence précoce du Néolithique au Sahara

GINETTE AUMASSIP

Il y a plus de 9 500 ans, dans le Sahara, des hommes prennent conscience qu'ils peuvent agir sur leur environnement. Ils fabriquent de la poterie, développent l'agriculture et l'élevage, et peignent leurs activités sur les roches.

Les préhistoriens ont longtemps pensé que le Croissant fertile, qui s'étend de la Méditerranée au Golfe persique, avait été le seul lieu d'émergence du Néolithique. Dans cette région, l'homme invente l'agriculture au cours du VIII^e millénaire avant J.-C. Il sème des graminées, pratique l'élevage et fabrique des poteries. Au Paléolithique, l'homme vivait de chasse et de cueillette. Au Néolithique, de prédateur, il devient producteur.

Ce nouveau mode de vie diffuse. Vers l'Ouest, une voie terrestre achemine le Néolithique jusque dans le Bassin parisien, en passant par le Nord des Balkans et par le bassin du Danube. Plus rapide, une voie maritime qui traverse l'Adriatique atteint la Méditerranée occidentale au VI^e millénaire avant J.-C. Franchissant le détroit de Gibraltar, le Néolithique se développe sur une étroite frange du littoral méditerranéen de l'Afrique, sans dépasser Oran à l'Est.

Ailleurs dans le Maghreb règnent des cultures dont les outils et les armes sont plus complexes qu'au Paléolithique : ils sont notamment formés de l'assemblage de petites pierres taillées. La mieux connue de ces cultures, le Capsien, s'étend sur les Hautes Plaines constantinoise et tunisienne. Dans les régions méridionales subsistent des cultures paléolithiques.

Selon ce scénario, le reste de l'Afrique ne découvre le Néolithique qu'à partir du IV^e millénaire avant J.-C. Les techniques et le mode de vie caractéristiques de cette période semblent importés de la vallée du Nil,

où on en trouve des traces à partir du VI^e millénaire. Les modalités de cette importation sont toutefois imprécises : contact, invasion... on ne sait.

Ce déroulement est contredit pour la première fois en 1965, lorsque Jean-Pierre Maître découvre dans l'Ahaggar, vaste massif montagneux du Sahara central, des fragments de poterie de plus de 9 000 ans. Les fouilles menées depuis sur de nombreux sites confirment cette ancienneté : dès le VIII^e millénaire avant J.-C., la poterie est répandue sur une grande partie du Sahara central. Ces vestiges sont les plus anciennes traces de l'agriculture dans la région.

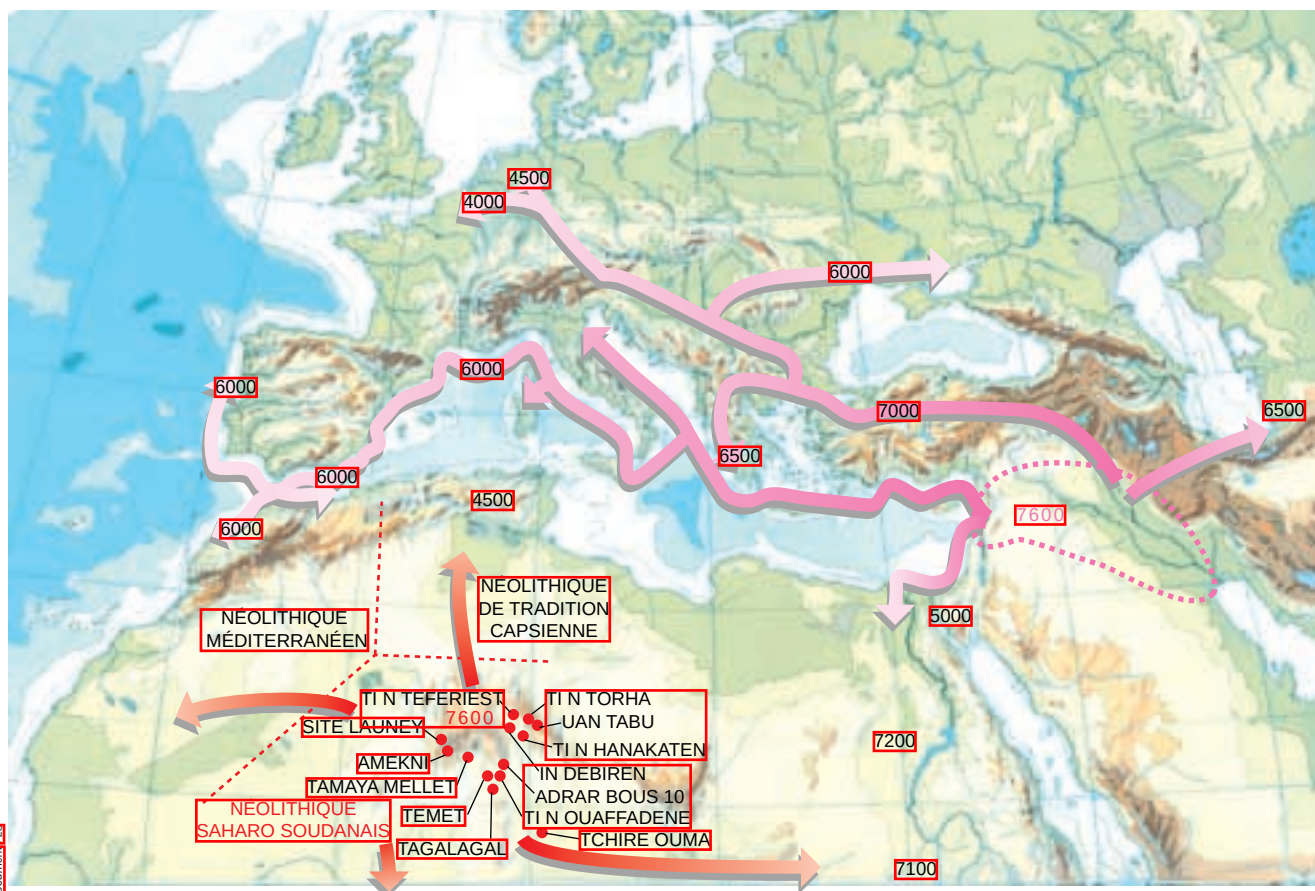
Ces découvertes ont conduit les préhistoriens à préciser les caractéristiques essentielles du Néolithique : plutôt qu'une révolution technique ou économique, c'est la période où les hommes prennent conscience de leur pouvoir sur le milieu. Ce changement de pensée est perceptible par une nouvelle maîtrise technique, par l'invention de la poterie et par la place prépondérante de l'homme dans l'art rupestre. Dans le Sahara, les preuves directes d'activités pastorales ne sont abondantes qu'après 5 500 avant J.-C., mais nous savons que les populations sahariennes, sédentaires ou nomades, ont cultivé la terre et ont pratiqué l'élevage à partir du VIII^e millénaire avant J.-C. Cette culture s'est développée pendant cinq millénaires, avant de disparaître à cause de l'aridité qui règne encore aujourd'hui dans cette région.

Qu'est-ce que le Néolithique ?

Comment définir le Néolithique ? Pour les préhistoriens, ce fut d'abord « l'âge de la pierre polie ». Des haches ou des herminettes, sortes de houes, produites par polissage de pierres dures, suffisaient à distinguer le Néolithique du Paléolithique, « âge de la pierre taillée ». Ces outils correspondaient à de nouvelles pratiques : travail du bois et défrichage pour les haches, travail de la terre pour les herminettes. En Afrique, où la pierre polie est rare et où des haches et des herminettes polies sont réutilisées jusqu'à l'époque actuelle, leur présence n'est toutefois pas significative.

Le Néolithique fut ensuite « le moment de la sédentarisation ». Cette idée reposait sur deux postulats. D'une part, les chasseurs-cueilleurs du Paléolithique auraient erré sans cesse à la recherche de leur nourriture. D'autre part, l'homme ne développerait l'agriculture qu'en vivant en permanence sur le même lieu, ce dont témoigneraient des constructions en matériaux non périssables. Au Proche-Orient, où un tel habitat construit « en dur » existe depuis plus de 10 000 ans, on supposait que la sédentarité, épuisant les ressources du milieu, avait engendré un besoin de production, donc l'agriculture.

Sédentarité et pratique de l'agriculture ne sont toutefois pas synonymes. En zone aride, des populations nomades actuelles ensemencent les terres inondables et n'y reviennent qu'au moment de la récolte. Au



1. UNE CULTURE NEOLITHIQUE s'est développée dans le Sahara central à partir de 7 600 avant J.-C. (les points rouges indiquent les principaux sites). Elle a diffusé en Afrique (flèches rouges) et aurait influencé les cultures de la vallée du Nil. Le Néolithique du Proche-Orient, apparu indépendamment à la même époque dans le Croissant fertile (pointillés roses), a diffusé à travers l'Europe, jusqu'au Nord de l'Afrique (flèches roses). Les dates portées sur

la carte (en années avant J.-C.) correspondent à l'apparition de la poterie. Au Sahara central, celle-ci est la principale marque de l'activité agricole du Néolithique. Des peintures rupestres indiquent aussi l'émergence de l'agriculture, même si les végétaux sont rarement figurés. À Ti n Teferiest, dans le Tassili n Ajjer, une scène peinte entre 10 000 et 5 000 avant J.-C. évoque le repiquage d'une plante (en haut).



Y. LAM

2. LES OUTILS DU NÉOLITHIQUE ANCIEN, dans le Sahara central, au VIII^e millénaire avant J.-C., sont taillés dans des roches difficiles à travailler, quartz ou roches éruptives. Leurs dimensions sont petites. Des pièces soigneusement façonnées, racloirs (*en haut, à gauche*) ou têtes de flèches (*en bas, au milieu*), voisinent avec des objets moins travaillés, portant de simples retouches. Celles-ci suffisent toutefois à rendre les outils efficaces.



Y. LAM

3. CE MORCEAU DE SAC qui contenait des graines de micocoulier, à Ti n Hanakaten, dans le Tassili n Ajjer, est daté de 6 800 avant J.-C. C'est l'un des plus anciens témoignages au monde de l'art du vannier. Un tressage très serré lui donne l'aspect d'une tapisserie au petit point. Un telle maîtrise technique prouve une longue pratique : l'homme préhistorique a fabriqué très tôt des vanneries.

En outre, dans divers abris du Sahara central, dont nous savons par d'autres indices qu'ils furent habités par des pasteurs vers 5 000 avant J.-C., nous n'avons retrouvé que des restes osseux d'animaux sauvages, moutons, gazelles, antilopes. Ces populations n'auraient, tels les pasteurs peuls actuels, consommé habituellement que le lait et le sang. L'abattage et la consommation de chair étaient pratiqués dans des lieux sacrés, lors de cérémonies rituelles.

L'homme commence à maîtriser la nature

Depuis quelques années, sous l'impulsion de Fabrizio Mori, de l'Université de Rome, pour l'Afrique, et de Jacques Cauvin, du CNRS, pour le Proche-Orient, une définition plus fondamentale du Néolithique est esquissée. C'est surtout l'avènement d'un nouveau mode de pensée, dont l'apparition n'est pas réductible à celle d'un objet ni d'une technique : l'homme prend conscience qu'il peut modifier son environnement. Cette attitude est identifiable de diverses manières : par un système de production, par la culture matérielle ou par les expressions symboliques.

Un tel changement est perceptible dans le Sahara à partir du VIII^e millénaire. La diversification des outils et l'apparition de techniques nouvelles ne sont pas que des adaptations fonctionnelles à des variations de l'environnement : elles témoignent d'un comportement nouveau.

Certains outils, tels les racloirs, sont plus nombreux. D'autres, telles les têtes de flèche, apparaissent. En outre, la conception même de l'outil change. Pendant le Paléolithique, les outils reproduisent un modèle. Au Néolithique, leur aspect est plus varié, comme s'il n'y avait plus de modèle et qu'une reproduction approximative suffisait. Le travail de la pierre, souvent limité à quelques retouches, semble sommaire. Ces retouches suffisent toutefois à rendre l'outil efficace : la perte de savoir-faire observée dans de nombreuses cultures néolithiques n'est qu'apparente. D'ailleurs, auprès de ces objets sommaires, on trouve des pièces soigneusement façonnées, même dans des matériaux aussi difficiles à tailler que des roches granitiques. Les ouvriers sont à la fois très habiles et désinvoltes.

Dans le Sahara central, où le Néolithique est le plus ancien, la culture

Proche-Orient même, nous savons aujourd'hui que les premiers habitats permanents sont antérieurs à l'agriculture, de plus de 1 000 ans.

«L'âge de la production» serait-il un meilleur intitulé pour le Néolithique? On le distinguerait ainsi de la vie prédatrice des chasseurs-cueilleurs. Si l'on suivait cette définition, des preuves directes d'une emprise de l'homme sur la nature caractériseraient ce changement.

Cette définition économique n'est pas plus satisfaisante. Au tout début du Néolithique, comment juger si des animaux ou des plantes sont sauvages ou domestiques? On ne sait pas en combien de temps leur domestication produit des caractères tranchés. En Afrique, particulièrement au Sahara, les restes osseux, et toute matière organique, sont rapidement détruits par l'acidité du sol et par l'érosion éolienne. Les pollens aussi sont mal conservés, et le vent les transporte sur de grandes distances.

paléolithique la plus récente, l'Atérien, le précède sans intermédiaire. Nous n'avons toutefois aucune preuve directe de continuité entre ces deux cultures : les couches néolithiques reposent sur le sol rocheux, par exemple à Amekni, dans l'Ahaggar, ou à Ti n Torha, dans l'Acacus, ou sur un dépôt de sable éolien qui les isole d'un niveau atérien sous-jacent, comme à Ti n Hanakaten, dans le Tassili n Ajjer.

Dans quelques sites, des préhistoriens ont cru que la présence d'outils produits par le débitage de roches en lames prouvait l'existence d'une phase intermédiaire, analogue à celle que l'on observe dans le Maghreb et en Égypte. Cette analyse est contestable. Au Sahara, une telle phase transitoire n'a été formellement identifiée que dans les régions où le Néolithique apparaît avec un retard de 1 000 à 3 000 ans.

Sur les bordures Nord et Est de l'Ahaggar, l'emploi sporadique, simultanément aux techniques néolithiques, de débitage Levallois (méthode de taille de la pierre apparue au cours du Paléolithique plusieurs centaines de milliers d'années auparavant), renforce l'hypothèse d'une filiation continue entre l'Atérien et le Néolithique. Il en est de même pour la découverte à Tagalagal, dans l'Aïr, de pointes pseudo-Levallois associées à des poteries. À Mankhor, dans la Tadrart, Nadjib Ferhat, du CNRPAH d'Alger, a aussi découvert, dans le même niveau archéologique, donc contemporain, des roches granitiques taillées par la technique Levallois, et des argilites et des silex débités selon une technique lamellaire plus moderne.

L'invention de la poterie

Vers 7 600 avant J.-C., un élément de conception nouvelle apparaît : la poterie. La propriété de l'argile de ne pas revenir à son état initial quand elle est passée au feu est connue depuis au moins 20 000 ans : des figurines du Paléolithique modelées dans l'argile, puis cuites, ont été retrouvées. L'idée d'utiliser ce matériau pour le façonnage de vastes récipients n'est toutefois attestée que vers le milieu du VIII^e millénaire.

L'apparition de la poterie marque une étape importante dans l'évolution humaine. Au Paléolithique, l'homme maîtrise le feu : il grille ses aliments et fait bouillir des liquides en y jetant des pierres chauffées. Les récipients en poterie sont toutefois les premiers

qui supportent d'être mis longtemps au feu. La poterie permet la préparation d'une «nouvelle cuisine» qui utilise le bouilli ; des céréales cuites sont introduites dans l'alimentation, qui se diversifie et devient plus abondante.

Au Sahara central, une dizaine de sites renferment de grands récipients en poterie, en particulier l'abri sous roche de Ti n Hanakaten, que nous fouillons depuis 1974. Son occupation, bien affirmée au milieu du VIII^e millénaire, est contemporaine de celle des premiers sites à poterie du Proche-Orient, voire plus ancienne. L'invention de la poterie a-t-elle été simultanée dans ces deux régions ou la technique a-t-elle rapidement diffusé ?

Les partisans de la diffusion mettent en avant l'absence de tentatives avortées de fabrication de la poterie au Sahara central : celle-ci apparaît brusquement. L'argument est toutefois irrecevable. Il n'existe en effet aucun intermédiaire entre l'argile crue et l'argile cuite. Il suffit pour s'en assurer de mouiller de l'argile portée à diverses températures. Si elle a été cuite à une température inférieure à 550 °C, température à laquelle des liaisons moléculaires deviennent incassables, elle revient à l'état terreux. Au-dessus, elle conserve la forme qui lui a été donnée ; elle se brise ou s'effrite,

mais laisse toujours un témoignage de sa présence.

En outre, nous ne connaissons pas de poterie aussi ancienne dans les régions intermédiaires entre les deux foyers néolithiques : la technique aurait-elle voyagé en une seule fois ? C'est peu probable. Enfin, les techniques de fabrication et les motifs décoratifs sont différents. Même si ces derniers évoluent rapidement du fait du remplacement fréquent des récipients, ces éléments renforcent l'hypothèse d'inventions indépendantes.

La poterie du Sahara central a-t-elle des racines plus anciennes encore ? Les sites où elle est utilisée à cette époque couvrent un territoire qui regroupe les massifs de l'Ahaggar, de l'Acacus et de l'Aïr. En 1996, Elena Garcea, de l'Université de Rome, en signalait à nouveau dans les fouilles d'Uan Tabu, confortant les découvertes antérieures faites par Gabriel Camps à Amekni, par Barbara Barich, de l'Université de Rome, à Ti n Torha, ou par Jean-Pierre Roset, de l'ORSTOM, à Tagalagal. La diffusion de la poterie sur cette zone géographique aussi étendue que la France a probablement pris du temps. L'identité de divers décors dont la réalisation est complexe indiquerait en revanche une certaine rapidité.



4. DES TESSONS DE POTERIES datés de 7 600 avant J.-C., retrouvés dans plusieurs sites du Sahara central, marquent l'apparition du Néolithique. Cinq ou six décors caractérisent ces poteries. Les motifs différents portés par les poteries du Sahara et du Proche-Orient à la même époque indiquent des inventions indépendantes dans ces deux foyers culturels.

L'invention du portrait

L'évolution des expressions symboliques, peintures et gravures rupestres, est un changement majeur, simultané de l'apparition de la poterie. Longtemps l'art rupestre saharien fut daté du IV^e millénaire : on le croyait contemporain de celui du Maghreb. Plusieurs découvertes récentes repoussent toutefois l'apparition de cet art saharien avant le paroxysme aride qui a marqué, au Sahara, la fin de la dernière glaciation, il y a plus de 10 000 ans. Des traits de certaines gravures ont en effet été érodés par le sable avant d'être patinés,

ce qui n'est possible que dans des conditions très arides. Ailleurs, des terrasses sédimentaires, que l'on sait dater, recouvrent des parois gravées.

Sur les représentations les plus anciennes, les animaux monumentaux, généralement représentés seuls, dominent. L'homme apparaît peu, et il est de petite taille ou, pour les plus grandes figures, masqué. Dans la période suivante, dite des Têtes rondes, les rapports s'inversent. Les animaux, encore parfois figurés seuls, sont le plus souvent en groupe ou en frise. L'homme devient omniprésent et peut atteindre des dimensions exceptionnelles. Cer-

tains personnages, nommés «grands dieux», mesurent jusqu'à six mètres de haut. Grâce à des similitudes entre les peintures et les vestiges archéologiques, Michel Taveron, de l'Institut Frobenius de Francfort, a relié cette période à celle des plus anciennes poteries. À cette époque, l'homme prend conscience de son pouvoir : il devient le maître de la Nature.

Les éléments que nous venons de présenter prouvent l'ancienneté du Néolithique saharien. Ils ne donnent toutefois aucune information directe sur deux faits couramment associés au Néolithique, en particulier au Proche-

Les sépultures

Les pratiques funéraires observées au début du Néolithique à Ti n Hanakaten, dans le Tassili n Ajjer, confirment une scène d'enterrement peinte à Uan Muhuggiag, dans l'Acacus. Le cadavre, enduit de kaolin, était placé dans une vannerie et déposé dans une fosse. Les corps étaient allongés sur le dos ou placés sur le côté, jambes légèrement repliées.

Au V^e millénaire, le blanc n'est plus associé à la mort et est remplacé par l'ocre. À Ti n Hanakaten, nous avons dégagé, pour cette période, une inhumation dans un caisson de pierre surmonté d'un petit tumulus. Le caisson était tapissé de végétaux et le défunt, un enfant, avait été couché sur le côté, membres repliés. Des fragments de peau, encore adhérents au crâne, montraient une implantation oblique des cheveux, typique des cheveux crépus. Une pierre plate enduite d'ocre se trouvait au-dessus de la tête. Ce même usage de l'ocre est retrouvé dans diverses inhumations plus tardives, dans des fosses.

Les sépultures montrent un mélange de peuplement. Selon Jean-Louis Heim, de l'Institut de paléontologie humaine, au VIII^e millénaire avant J.-C., des peuples négroïdes pourvus d'affinités méditerranéennes étaient mêlés à un type plus robuste. De même,

M.C. Chamla attribue la plupart des restes humains retrouvés dans le Sahara central à des individus négroïdes, aux caractéristiques plus ou moins affirmées, et certains à des europoïdes. En revanche, Olivier Dutour, de l'Université d'Aix-Marseille, voit, aux mêmes latitudes et aux mêmes époques mais dans les plaines occidentales, des populations mechoïdes, semblables aux Cro-Magnons européens. Pour les périodes les plus récentes, il observe un peuplement protoméditerranéen.

L'art rupestre des massifs centraux confirme cette diversité de la population. Les quelques profils de la période bubaline, antérieure au Néolithique, qui furent identifiés comme europoïdes sont aujourd'hui considérés comme peu représentatifs. Dès la période suivante, dans les peintures des Têtes rondes, des individus aux caractères plutôt négroïdes coexistent avec d'autres plutôt europoïdes. L'art bovidien, postérieur, montre plus nettement cette juxtaposition, à laquelle on ajoute habituellement un troisième type, nommé hamitique. Ce dernier est-il lié à une meilleure représentation des faciès humains ou à l'arrivée d'une nouvelle population ?



Cette sépulture de Ti n Hanakaten, dans le Tassili n Ajjer, est datée du VIII^e millénaire avant J.-C., au début du Néolithique. Le mort est enduit de kaolin, dont des particules blanches subsis-

tent dans la fosse et sur les os. Membres fléchis, il est enveloppé d'une vannerie avant d'être mis en fosse. Le kaolin sera plus tard remplacé par l'ocre, et la vannerie par un lit de graminées.

Orient : la production agricole et la sédentarité. Comment vivaient les populations sahariennes de cette époque? Comment ont-elles exercé leur emprise sur leur environnement? Avant de répondre à ces questions, décrivons cet environnement, bien différent du désert actuel.

Dans le Sahara méridional et central, le Néolithique se développe pendant une phase humide. Celle-ci s'installe en altitude vers 11 000 avant J.-C., dans le piedmont entre 8 000 et 7 000, et persiste jusqu'en 2 500 avant J.-C. Elle n'est interrompue qu'entre 5 500 et 5 000 avant J.-C. par une période très aride.

Entre 7 000 et 5 500 avant J.-C., le climat est froid et les pluies permanentes. Les régions méridionales contiennent de nombreux lacs et marais et, dans les régions occidentales, les pluies abondantes déposent des alluvions. La région Nord est plus sèche : dans la Saoura, les eaux proviennent des montagnes marocaines ; dans la cuvette de l'erg oriental, des nappes artésiennes sont rechargées par des écoulements de son pourtour. De plus grandes densités de peuplement humain signalent les émergences de ces nappes.

Quelle que soit la région, le milieu où s'épanouit le Néolithique au cours du IV^e millénaire avant J.-C. évolue vers l'aridité. Le désert actuel s'installe entre 2 500 et 2 000 avant J.-C.

Selon l'altitude, une flore tropicale ou à affinités méditerranéennes se développe. Cette dernière est différente de la flore du Maghreb. Le Maghreb, en effet, est séparé du Sahara central par une zone désertique, qui a aussi probablement modifié les relations entre les hommes et entre les cultures. Les premières populations néolithiques du Sahara central ont vécu dans des groupements à micocouliers, dont on retrouve de nombreuses graines dans la plupart des gisements. La faune, caractéristique d'un environnement partiellement sec, dénote plus un paysage de forêts galeries qu'un manteau arbustif.

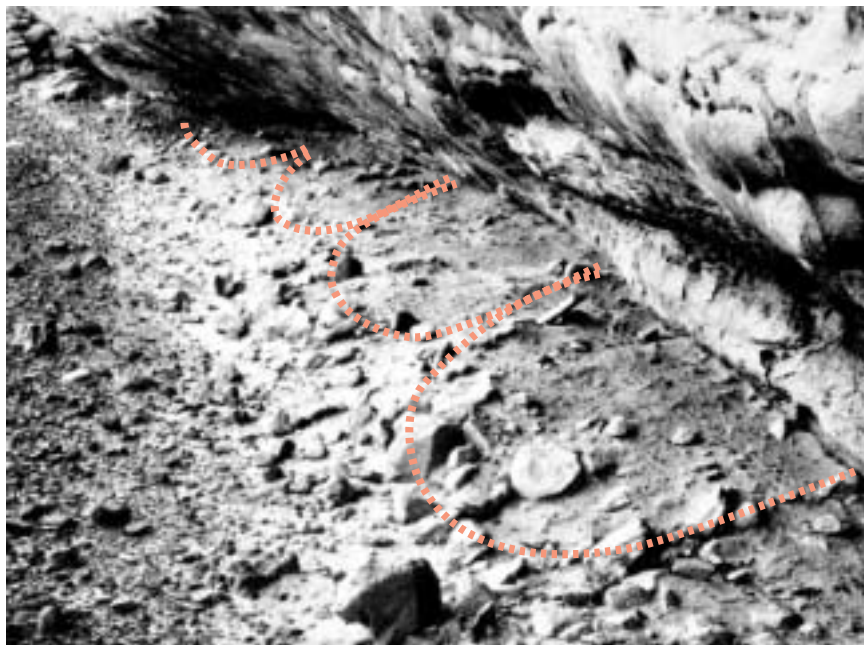
Élevage et culture

Au Sahara central, l'emprise de l'homme sur la nature est surtout perceptible par les premiers témoignages de l'élevage. Ils concernent en majeure partie les bovins, mais des gravures anciennes montrent des girafes et des éléphants. Les peintures des Têtes rondes font figurer le mouflon et l'antilope dans des rôles de premier plan. À

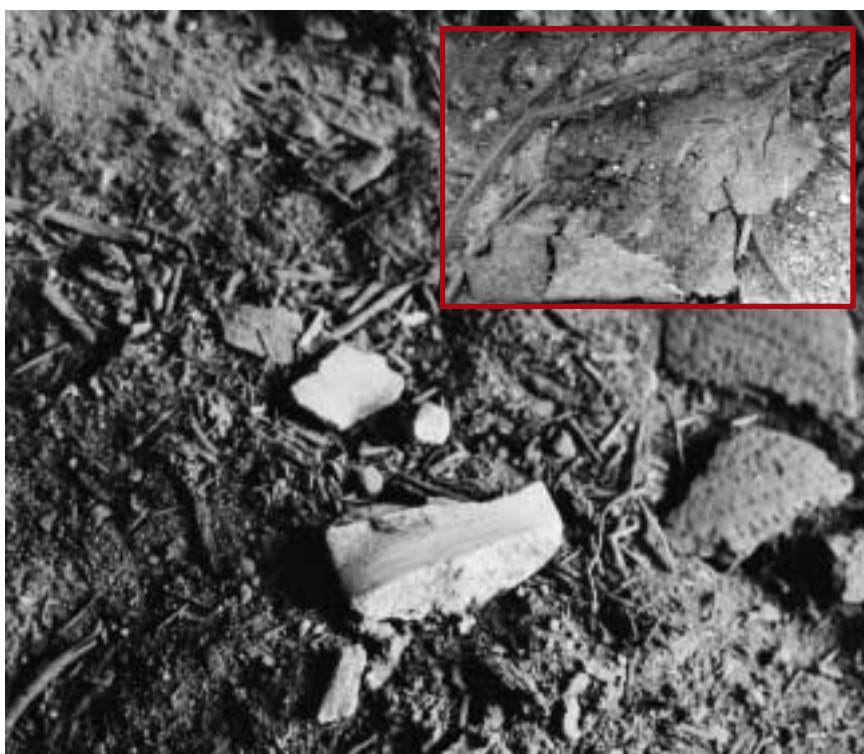
Rhardès ou à Sefar, dans un milieu où l'élevage des bovins commence à s'affirmer, Henri Lhote a identifié des peintures qui montreraient l'antériorité d'un bétail constitué d'ovins et de caprins. Il faut cependant attendre 5 000 avant J.-C. pour disposer des indica-

tions précises que sont les parcs à bœufs, les peintures de troupeaux et les inhumations de bovins.

La culture du sol est plus difficile à identifier. Gérard Quechon, de l'ORS-TOM, a découvert à Tchire Ouma, dans le massif de Termit, au Niger, des pla-



5. LES HABITATS NÉOLITHIQUES DU SAHARA CENTRAL ont une forme semi-circulaire (traits orange), en appui sur des parois rocheuses, tel celui de Ti n Torha, dans l'Acacus.



6. UNE LITIÈRE VÉGÉTALE tapissait une partie du sol d'une cabane dans l'abri saharien de Ti n Hanakaten, au Tassili n Ajjer, entre 7 500 et 7 000 avant J.-C. Les végétaux ont été très bien préservés (voir le détail dans le cartouche) sous 1,5 mètre de cendres provenant des occupations postérieures. La couche de cendre était maintenue par une couche de fumier et couverte par une dizaine de centimètres de sable apporté par le vent



7. LES COMMENCEMENTS DE L'ELEVAGE sont représentés par l'art rupestre. Des bovins gravés à In Debiren, dans le Tassili n'Ajjer (à gauche), sont enchevêtrés : ils évoquent un troupeau. Un

personnage qui tire un mouflon gravide, sur une peinture de Ti n Tazarift (à droite), indique que la domestication de ces animaux, ou leur élevage, a été tentée.

quettes de grès encochées, généralement ogivales, datées du VIII^e millénaire. Il s'agirait de houes, qui prouveraient un travail du sol.

Les autres indices sont rares : deux pollens de mil à Amekni, deux de céréales à Meniet. C'est peu, mais à Amekni, l'abondance des composées liguliflores (de la famille du pissenlit) évoque un défrichement. L'art rupestre représente peu la flore, et la seule plante clairement domestique qui y figure, le palmier, est de dessin tardif. K.H. Striedter, de l'Institut Frobenius de Francfort, interprète toutefois une peinture de Ti n Teferiest, datée entre 10 000 et 5 500 avant J.-C., comme une scène de plantation (voir la figure 1).

Au Néolithique, les comportements prédateurs ne disparaissent pas. Des harpons, des hameçons et des restes de poissons et de bivalves, dans le Sahara central et méridional, attestent de la pratique de la pêche. Celle-ci apparaît aussi dans des représentations rupestres, avec la figuration de poissons.

Malgré les variations climatiques, et surtout un demi-millénaire de forte aridité entre 5 500 et 5 000 avant J.-C., la région ne s'est pas dépeuplée. La population a probablement diminué aux périodes les plus sèches, mais elle s'est surtout distribuée différemment, en pratiquant notamment le nomadisme. Même aux moments de plus grande aridité, des orages apportent l'eau nécessaire au maintien de la vie, tantôt ici, tantôt là. Les hommes savaient gérer cette ressource : des vestiges d'aménagements hydrauliques, antérieurs au VIII^e millénaire, ont été découverts. Des rigoles drainaient l'eau de ses points d'émergence jusqu'à des

cuvettes creusées dans la roche, et des canalisations captaient des cascades.

Le nomadisme permet d'exploiter un milieu aride. Des populations ont-elles toutefois été sédentaires lors des périodes humides ? Au Sahara central, des habitats sont aménagés dans des abris sous roche dès le Néolithique ancien. De gros blocs forment des cercles ou des demi-cercles appuyés contre une paroi. Ils servaient probablement de base à une protection en végétaux ou en peaux. Les surfaces ainsi délimitées sont parfois soigneusement dallées. Dans le vaste abri de Ti n Hanakaten, une aire était partiellement occupée par les restes d'une litière de feuillus. Des huttes de même conception subsistent dans la période suivante, où elles sont fréquemment figurées par l'art rupestre.

Aucun de ces aménagements ne prouve la sédentarité. Celle-ci se manifeste davantage par l'épaisseur de certains dépôts archéologiques, sans discontinuité perceptible, qui ne seraient formés que par une longue durée d'occupation, continue ou coupée de brèves absences. Cette caractéristique est présente dans de nombreux habitats sous abri. Il est peu probable, pourtant, que la totalité des populations sahariennes d'alors aient été sédentaires. L'environnement, trop fragile, aurait été rapidement détruit. Comme aujourd'hui dans diverses régions africaines, des populations sédentaires et nomades peuvent occuper les mêmes territoires en s'adonnant à des activités différentes.

L'Afrique, où sont apparus les premiers hominidés, a aussi abrité l'un des premiers foyers de culture néolithique. Pour le reconnaître, les préhistoriens

ont dû accepter l'idée que l'apparition et le développement de cette culture n'ont pas partout suivi le même scénario : le Néolithique a pris diverses formes dans différentes parties du monde. En outre, alors que l'on pensait que l'agriculture avait été, dans le Sahara, importée de la vallée du Nil, on recherche aujourd'hui la confirmation du trajet inverse. Et si la civilisation de la Haute-Égypte ancienne était l'héritière du Néolithique saharien, dont l'art rupestre témoigne qu'il fut une culture brillante ?

Ginette AUMASSIP, directeur de recherche au CNRS, travaille au Laboratoire de recherche sur l'Afrique orientale et au Centre national de la recherche préhistorique, anthropologique et historique d'Alger.

J.-P. ROSET, *Tagalagal : un site à céramique au X^e millénaire avant nos jours dans l'Aïr (Niger)*, Comptes rendus de l'Académie des inscriptions et belles lettres, Paris, 1982.

K. H. STRIEDTER, *Felsbilder der Sahara*, Prestel, Munich, 1984.

Prehistory of Arid North Africa, sous la direction de A. Close, Dallas, 1987.

G. AUMASSIP et M. TAVERON, *Le Sahara central à l'Holocène, Considérations générales*, Arte e ambiente del Sahara preistorico, Milan, 1992.

M. TAVERON, *Relations art rupestre-eau dans le Sahara central*, Rock art research-moving in the twenty-first century, Swakopmund, Namibie, 11-18 août 1996.

Préhistoire de l'Afrique de l'Ouest, Sepia, Paris, 1996.

L'immunothérapie des cocaïnomanes

DONALD LANDRY

De nouvelles substances, dérivées de molécules fabriquées par le système immunitaire, combattraient les effets de la cocaïne en détruisant la drogue dans le sang, avant qu'elle n'atteigne le cerveau.

Le nombre des personnes qui se droguent à la cocaïne augmente depuis dix ans. Certains souffrent de troubles psychologiques graves, d'autres décèdent de crises cardiaques, et les conséquences sociales de la vente illicite de cocaïne sont désastreuses.

La société n'a pas réussi à interdire la consommation de cocaïne ni la vente d'une autre drogue qui se fume et dont les effets sont encore plus puissants, le «crack» ; la science, elle, n'a pas non plus apporté de remède : malgré des décennies d'efforts, les pharmacologues n'ont pas encore trouvé de substance susceptible de traiter efficacement la dépendance ou les overdoses de cocaïne. Devant cet échec, nous avons abordé la question d'une tout autre façon : si les «médicaments» classiques tentent d'empêcher la cocaïne d'agir dans le cerveau, nous cherchons à la détruire avant qu'elle ne l'ait atteint.

Comment la cocaïne agit-elle sur le cerveau ? Toutes les drogues qui rendent les consommateurs dépendants stimulent un «circuit de la récompense», qui est apparu chez les ancêtres des mammifères, il y a plus de 100 millions d'années. Ce circuit active la région cortico-limbique, qui commande les émotions et les comportements fondamentaux. Chez les espèces les moins évoluées, l'activation du circuit de la récompense pendant des comportements tels que l'alimentation ou l'accouplement ont favorisé l'apprentissage et la survie de l'espèce. Ces structures sont encore aujourd'hui à la base de la perception du plaisir. Quand des molécules



1. LE CRACK ET LA POUDRE DE COCAÏNE sont deux formes de la même drogue.

du système nerveux, les neuromédiateurs, stimulent ces circuits, on se «sent bien».

Les drogues activent un circuit neurobiologique nommé «circuit du renforcement» ou «circuit de la récompense» : toute substance qu'une personne s'administre en quantité excessive – qu'il s'agisse d'alcool, de nicotine, de barbituriques, d'amphétamines, d'héroïne, de haschich ou de cocaïne – stimule le circuit de la récompense, qui incite l'utilisateur à en consommer à nouveau pour retrouver les mêmes sensations. De surcroît, ces substances perturbent la production normale des neuromédiateurs, de sorte que l'arrêt de la consommation, une fois la dépendance établie, déclenche un syndrome de manque : les troubles physiques ou psychologiques sont toujours très désagréables et parfois graves. Les êtres humains (et divers animaux) sont capables de travailler, de se priver d'autres plaisirs, ou de supporter la douleur pour

se procurer la drogue dont ils sont devenus dépendants.

L'intensité du renforcement dépend de la drogue. Elle augmente en fonction de la quantité de drogue qui atteint le cerveau et de la rapidité à laquelle la drogue s'accumule. Les injections intraveineuses sont généralement les plus efficaces, sauf pour le crack, dont l'inhalation produit les effets recherchés. La cocaïne, injectée ou fumée sous forme de crack, agit puissamment sur le circuit de la récompense. Son mécanisme d'action spécifique la rend très difficile à combattre.

La cocaïne à l'œuvre

La cocaïne «ouvre» tous les interrupteurs du circuit de la récompense. Ce circuit, comme tous les circuits neuronaux, contient des synapses – des zones de contact entre deux neurones – où la transmission de l'information résulte de la libération de neuromédiateurs. Lorsqu'un neurone présynaptique (en amont de la synapse) est activé, il libère un neuromédiateur, telle la dopamine, dans la fente synaptique, l'espace étroit qui sépare les deux neurones ; la fixation du neuromédiateur du récepteur du neurone postsynaptique (en aval de la synapse) modifie l'activité de ce dernier (il est activé ou inhibé, selon les types de neuromédiateurs). Pour empêcher une activation excessive, le neurone présynaptique réabsorbe l'excès de neuromédiateur libéré dans la fente synaptique.

La cocaïne perturbe cette réabsorption. Normalement, la réabsorption de la dopamine est assurée par des

protéines qui transportent le neurotransmetteur, de l'extérieur vers l'intérieur du neurone. La cocaïne bloque le fonctionnement de ces protéines, de sorte qu'une quantité excessive de dopamine reste dans la fente synaptique. Ce neurotransmetteur hyperactive le circuit de la récompense et encourage l'usage de la cocaïne.

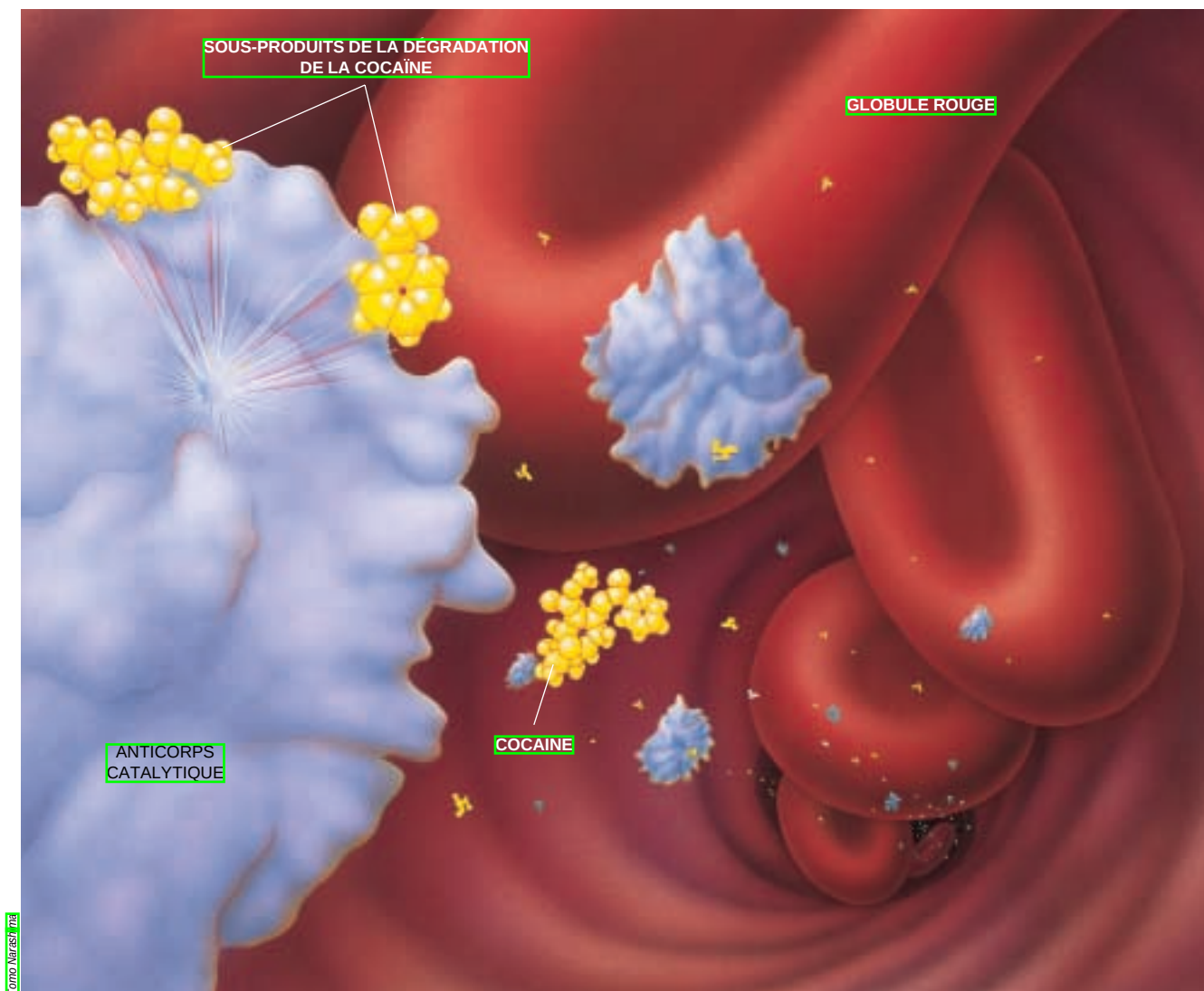
Les drogues n'ont pas toutes la même action. L'héroïne, par exemple, se lie à un récepteur qui stimule directement le circuit de la récompense, même en l'absence de dopamine. La cocaïne stimule les mêmes circuits, mais indirectement, en prolongeant l'action des neurotransmetteurs libérés. On peut empêcher l'héroïne d'agir en administrant des composés inactifs, qui se lient aux récepteurs de l'héroïne, l'empêchant d'y accéder et d'agir : ces composés, telle la naltrexone, sont des leurreurs pharmacologiques. En

revanche, on inhibe beaucoup plus difficilement la cocaïne, parce que tout composé qui empêcherait la cocaïne d'atteindre sa cible – le transporteur de la dopamine – perturberait sans doute l'efficacité du transporteur qui doit éliminer la dopamine de la fente synaptique : autrement dit, le composé administré aurait quasiment les mêmes effets que la drogue. Bien que l'on ait récemment élucidé certains détails des interactions de la dopamine et de la cocaïne avec le transporteur, on n'a pas encore trouvé de substance inhibant les effets de la cocaïne dans le cerveau.

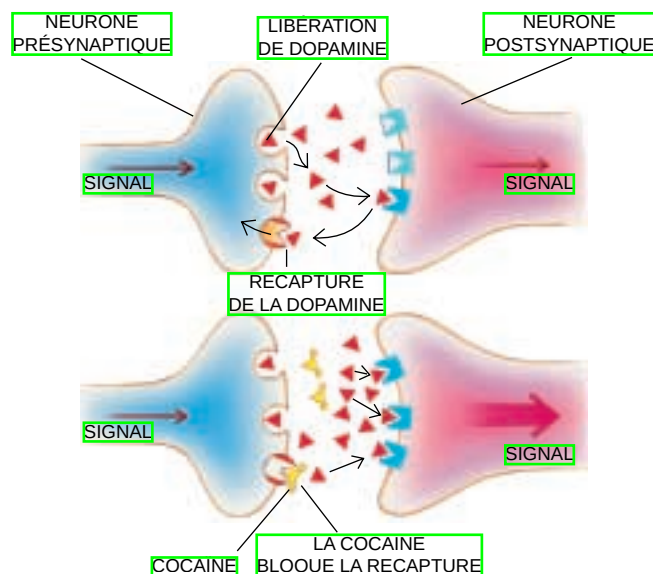
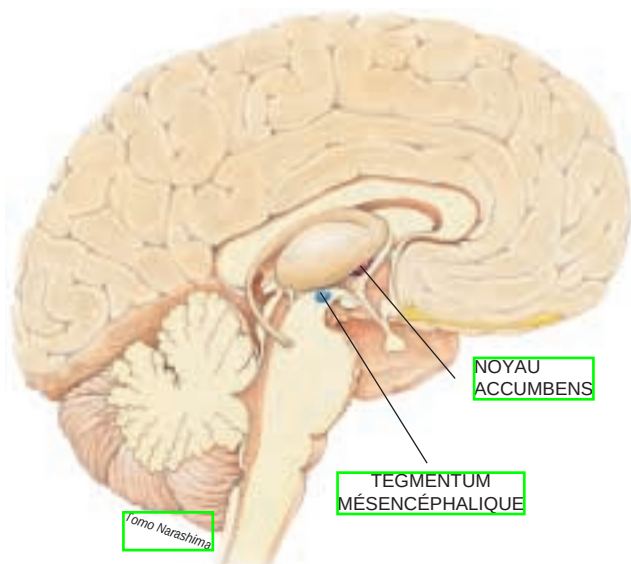
Comment empêcher alors la cocaïne d'atteindre le cerveau ? Quel que soit son mode d'administration, la cocaïne est transportée vers le cerveau par le sang. Aussi les anticorps (des molécules du système immunitaire qui se lient à des cibles spécifiques) pourraient l'intercepter dans le sang. En

1974, Charles Schuster, de l'Université de Detroit, avait découvert que l'injection à un singe d'un analogue de l'héroïne inhibe partiellement les effets de la drogue : l'analogue active le système immunitaire qui déclenche la synthèse d'anticorps dirigés contre cette molécule. Malheureusement, les anticorps circulants disparaissent rapidement du sang dès qu'ils forment des complexes avec leur cible. Comme les toxicomanes consomment la cocaïne de façon répétée, un anticorps efficace contre la drogue devrait inhiber celle-ci sans être lui-même inactivé ou éliminé. En outre, comme la cocaïne peut lier jusqu'à 250 fois son propre poids en anticorps, le sang ne contiendrait jamais assez d'anticorps pour capter une dose unique de cocaïne d'une centaine de milligrammes.

Les anticorps catalytiques résoudraient ce problème. Vers la fin des



2. POUR LUTTER CONTRE LA DÉPENDANCE À LA COCAÏNE, on pourrait injecter des molécules d'anticorps dans le sang, où elles piègeraient la drogue et la dégraderaient. Les anticorps inactiveraient la drogue avant qu'elle n'agisse dans le cerveau.



3. LA COCAÏNE provoque une dépendance en stimulant de façon excessive un circuit neuronal qui déclenche l'euphorie. Ce circuit comprend (à gauche) des neurones dont le corps cellulaire est localisé dans le tegmentum mésencéphalique, et dont les prolongements aboutissent dans le noyau accumbens. Lorsque la dopamine, un neuromédiateur, libérée par les neurones du tegmentum mésencéphalique, se lie aux

récepteurs des neurones postsynaptiques (ceux du noyau accumbens), le système est stimulé (en haut à droite). Dans les conditions normales, le signal est atténué parce que la dopamine est éliminée de la synapse : les neurones qui l'ont libérée la recaptent. Au contraire, la cocaïne bloque ce recyclage (en bas), de sorte que la dopamine s'accumule dans la synapse et active le circuit dit de la récompense.

années 1980, Richard Lerner, de l'Institut de recherche Scripps, Stephen Benkovic, de l'Université de Pennsylvanie, et Peter Schultz, de l'Université de Berkeley, ont réussi à fabriquer des anticorps qui se lient spécifiquement à des molécules cibles et en facilitent la décomposition chimique. Une fois que cette dégradation s'est produite, les anticorps catalytiques libèrent les produits de la réaction et peuvent à nouveau se lier à une autre molécule. Certains anticorps catalytiques sont très actifs : ils accomplissent plusieurs dégradations par seconde ; aussi avons-nous supposé qu'une petite quantité de ces anticorps inactiverait des doses notables de cocaïne.

souvent faibles. Toutefois, les estérases, qui dégradent les esters (la cocaïne est un ester), sont presque aussi efficaces que les enzymes naturelles : des anticorps dirigés contre la cocaïne devaient dégrader la drogue assez vite pour qu'elle n'ait pas le temps d'agir.

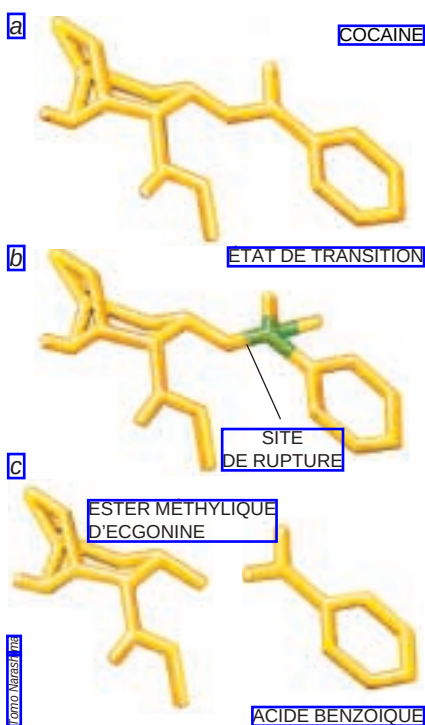
Ainsi le circuit de la récompense, responsable de la dépendance, serait interrompu.

Une expérience où l'on utilise de la cocaïne naturelle et son image biologiquement inactive, la (+)-cocaïne, semblait également indiquer que la technique des anticorps catalytiques serait inutile. Les deux molécules ont la même composition chimique, mais leurs structures sont symétriques, comme la main droite et la main gauche. Lorsqu'on injecte les deux composés à un singe, seule la cocaïne naturelle atteint le cerveau, parce que l'enzyme naturelle qui dégrade la cocaïne naturelle et son énantiomère agit 2 000 fois plus vite sur l'énantiomère : la moitié de la quantité de (+)-cocaïne injectée était dégradée en cinq secondes environ. Une enzyme qui aurait le même effet sur la cocaïne naturelle rendrait la drogue inoffensive.

Une rupture facile

La méthode des anticorps catalytiques semblait applicable à la cocaïne, notamment parce que la molécule se coupe facilement en deux sous-produits inactifs. Une enzyme présente dans le sang assure cette réaction de dégradation, mais elle agit trop lentement pour prévenir la dépendance. Au contraire, la dégradation de l'héroïne libère de la morphine : une drogue est remplacée par une autre drogue.

Les anticorps catalytiques favorisent des transformations chimiques variées (plus d'une quarantaine), avec des vitesses de réactions variables, mais



4. LA DÉGRADATION de la cocaïne nécessite une modification de sa structure. La forme native (a) passe par un état de transition moins stable (b). Elle est ensuite dégradée en deux substances inactives (c).

Nous avons alors cherché des anticorps catalytiques capables de dégrader la cocaïne. Nous voulions créer un analogue de la cocaïne qui stimulerait le système immunitaire d'animaux de laboratoire, afin qu'ils produisent des anticorps dirigés contre la cocaïne ; on pourrait alors les purifier et les fabriquer en grande quantité. Plus précisément, nous voulions créer une molécule dont la structure ressemblerait à celle de la cocaïne dans «son état de transition», la forme qu'elle prend au milieu de la réaction de dégra-

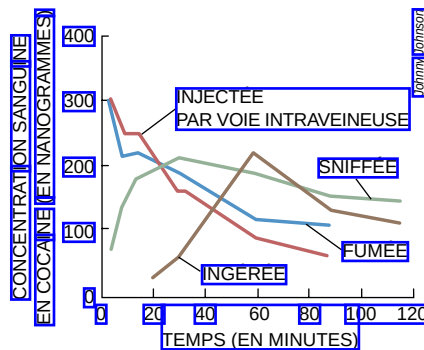
dation, à mi-chemin entre la forme initiale et la forme dégradée. Effectivement, les plis, les poches et les sites actifs d'un anticorps catalytique sont adaptés à la configuration de l'état de transition. L'anticorps aide la molécule cible à adopter cette configuration, augmentant ainsi la probabilité que la réaction de décomposition ait lieu.

Nous avons construit notre analogue de l'état de transition en remplaçant un groupe d'atomes par un autre qui stabilise l'état de transition. Nous avons dû concevoir une nouvelle méthode pour synthétiser ce composé, car aucune des méthodes connues n'avait fourni la structure voulue. Une fois l'analogue de l'état de transition de la cocaïne synthétisé, nous y avons attaché une protéine qui devait déclencher la réaction immunitaire (les petites molécules ne déclenchent généralement pas la production d'anticorps, de sorte que l'organisme ne produit pas d'anticorps contre la cocaïne ni contre l'aspirine, par exemple).

Enfin, nous avons injecté notre composé à des souris et isolé les cellules qui produisaient les anticorps contre lui. Parmi ces cellules, nous avons trouvé deux lignées qui fabriquaient des anticorps qui se lient à la cocaïne, la dégradent, libèrent des produits inactifs et recommencent leur cycle d'action : c'étaient les premières enzymes artificielles capables de dégrader la cocaïne. Depuis, nous avons synthétisé deux autres analogues de l'état de transition, et nous avons aujourd'hui neuf anticorps catalytiques anticocaïne. Chaque molécule de l'anticorps le plus puissant dégrade plus de deux molécules de cocaïne par minute. Cette activité était suffisante pour les premières études animales.

Pour que de tels anticorps soient utilisables chez l'homme, ils devront être plus actifs. Le sang d'un drogué dépendant devrait contenir plus de dix grammes de notre anticorps le plus actif pour qu'une prise de 100 milligrammes de cocaïne soit neutralisée, ce qui n'est pas envisageable. Si la vitesse de réaction atteignait deux dégradations par seconde, 500 milligrammes d'anticorps, facilement injectables à l'aide d'une seringue, limiterait notablement la quantité de cocaïne dans le cerveau. Comme certains anticorps catalytiques agissent plus de 40 fois par seconde, cet objectif semble réaliste.

Pour améliorer l'activité chimique de nos anticorps catalytiques, nous



5. LA CONCENTRATION SANGUINE en cocaïne augmente plus rapidement quand la drogue est fumée ou injectée que lorsqu'elle est sniffée ou ingérée : l'effet produit est supérieur. Le traitement par des anticorps catalytiques n'éliminerait pas totalement la drogue, mais réduirait l'intérêt pour la cocaïne en affaiblissant la puissance de son action.

avons élaboré une stratégie permettant d'obtenir d'autres analogues de l'état de transition, qui devraient déclencher la production d'anticorps catalytiques très actifs : quand ces anticorps se lient à ces nouveaux analogues, la cocaïne adopte une configuration fragile et se scinde en deux presque spontanément. Nous mettons également au point des méthodes de sélection des anticorps en fonction de leur activité catalytique, plus que de la force de liaison à un analogue de l'état de transition. Enfin, nous avons cloné nos anticorps catalytiques, de sorte que nous pourrions en modifier spécifiquement la structure.

Les anticorps au travail

Même lorsque nous disposerons d'anticorps catalytiques dégradant efficacement la cocaïne, un traitement efficace contre la drogue ne sera pas immédiatement disponible. Les médecins ne pourront pas vacciner les drogués dépendants avec un analogue de l'état de transition, car seuls quelques-uns des anticorps produits contre cet analogue seraient des anticorps catalytiques efficaces. Pour que la concentration sanguine en anticorps catalytiques soit élevée, il faudra les injecter directement ; c'est une immunisation passive. Dans ces conditions, les laboratoires pharmaceutiques devront obtenir des lignées cellulaires produisant de grandes quantités de ces anticorps ; compte tenu des évolutions actuelles, une telle fabrication est envisageable.

Trouvera-t-on un anticorps catalytique qui resterait dans le sang pen-

dant plusieurs semaines, comme les anticorps humains naturels ? Le traitement des drogués en serait facilité, dans la mesure où une seule injection inhiberait la cocaïne pendant un mois. Un tel traitement serait suffisamment long pour calmer les angoisses psychologiques les plus graves, et pour qu'un traitement classique contre la dépendance commence à agir.

La majorité des drogués qui suivent une cure de désintoxication continuent à prendre de la cocaïne, même lorsqu'ils bénéficient d'un soutien psychologique et des traitements de la dépendance. Si la cocaïne pouvait être dégradée dans le sang, les autres traitements seraient plus efficaces. Ainsi, parmi les héroïnomanes bénéficiant d'un traitement qui combine soutien psychologique et méthadone, 60 à 80 pour cent cessent de consommer la drogue ; en revanche, 10 à 30 pour cent seulement arrêtent s'ils n'ont pas de méthadone (la méthadone est une drogue qui agit sur les récepteurs morphiniques, mais dont les effets sont inférieurs à ceux de l'héroïne et qui évite le syndrome de manque au cours des cures de désintoxication).

Même si une substance bloquant la cocaïne n'empêchait pas toute la drogue d'atteindre le cerveau, elle diminuerait la dépendance en atténuant l'intensité des sensations provoquées par la drogue. Le besoin impérieux de fumer une forte dose de crack se limiterait à celui de sniffer quelques milligrammes de poudre. Cette différence serait, à elle seule, suffisante pour conduire les drogués dépendants sur la voie de la guérison.

Donald LANDRY est professeur à la Faculté de médecine de l'Université de Columbia.

Richard A. LERNER et Alfonso TRAMONTANO, *Les anticorps catalytiques*, in *Pour la Science*, mai 1988.

D.W. LANDRY, K. ZHAO, G.X.-Q. YANG, M. GLICKMAN et T.M. GEORGIADIS, *Antibody-Catalyzed Degradation of Cocaine*, in *Science*, vol. 259, pp. 1899-1901, 26 mars 1993.

G. YANG, J. CHUN, H. ARAKAWA-URAMOTO, X. WANG, M.A. GAWINOWICZ, K. ZHAO et D.W. LANDRY, *Anti-Cocaine Catalytic Antibodies : A Synthetic Approach to Improved Antibody Diversity*, in *Journal of the American Chemical Society*, vol. 118, n° 25, pp. 5881-5890, 26 juin 1996.

Les tambours liquides

MARIA BRAZOVSKAIA • CATHERINE EVEN • PAWEL PIERANSKI

La mesure des fréquences de vibration de la peau d'un tambour en cristal liquide confirme que des formes différentes donnent parfois les mêmes fréquences : on ne peut pas entendre la forme d'un tambour !

Les bruits qui frappent, plus ou moins agréablement, nos oreilles résultent quelquefois de vibrations de cordes, le plus souvent de vibrations de plaques métalliques de formes variées. Les changements de ces vibrations se traduisent par des changements de sons, lesquels dénotent parfois le défaut des organes d'une machine : nous savons qu'une fêlure est diagnostiquée à l'oreille, et que l'on écoute si un moteur «tourne rond».

Depuis les travaux du physicien anglais Rayleigh, au XIX^e siècle, nous savons, pour quelques contours simples (triangle, cercle, carré), calculer le spectre de vibration d'une membrane, c'est-à-dire déterminer ses fréquences de vibration.

Les mathématiciens ont examiné le problème réciproque : pouvons-nous

«remonter à la source» et connaître la forme d'une surface à partir de son spectre de vibration ? Cette question a été posée pour la première fois par M. Kac (mathématicien américain d'origine polonaise), en 1966, sous la forme suivante : «Can one hear the shape of a drum?» ou : «Peut-on, à partir du spectre de fréquences, déterminer la forme du tambour?»

Après un long cheminement, la réponse théorique à cette question a enfin été apportée en 1992 par les mathématiciens américains C. Gordon, D. Webb et S. Wolpert. On peut la résumer de façon lapidaire : «Non.»

Nous verrons dans cet article comment l'analyse des vibrations d'un film de cristal liquide, très proche d'un tambour idéal, confirme l'analyse mathématique.

Les cristaux liquides

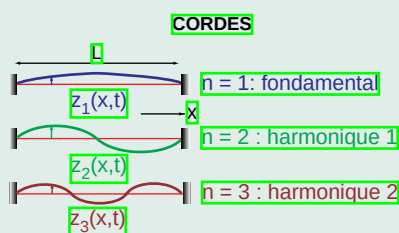
Les trois états habituels de la matière, solide, liquide et gazeux, sont connus de tous. Certaines substances présentent des états intermédiaires où les molécules s'arrangent en structures qui tiennent à la fois du liquide et du solide cristallin. Ces états ont été découverts à la fin du XIX^e siècle par le biologiste M. Reinitzer, puis baptisés «mésophases» par Georges Friedel en 1921.

Quelles propriétés spécifiques des molécules leur permettent-elles de former des mésophases ? La réponse est que, souvent, les molécules ont une structure très compliquée, avec plusieurs parties attachées chimiquement. Par exemple, certaines comportent un «noyau» rigide et une «queue» flexible. Si ces deux parties étaient des molécules séparées, elles auraient des températures de transition solide-liquide différentes. Ainsi, pour la molécule composée des deux parties, il existe un intervalle de température où le noyau «veut» être dans l'état cristallin, et la queue dans l'état liquide. La compétition entre les deux conduit à la formation d'une mésophase dans une fourchette de températures.

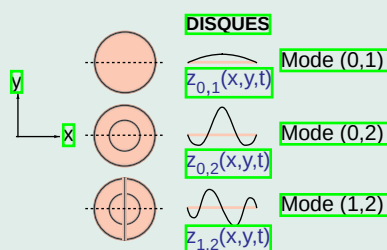
Une autre dénomination des mésophases est «cristaux liquides». Adopté pour des raisons historiques, ce nom exprime également le caractère intermédiaire des mésophases. La dénomination «cristal liquide» est plus courante, de sorte que nous l'utiliserons par la suite, bien qu'elle puisse introduire des confusions : un cristal liquide n'a jamais l'aspect cristallin ; c'est plutôt un liquide très visqueux.

Nous nous intéressons plus particulièrement aux cristaux liquides dits smectiques, qui sont caractérisés par l'organisation des molécules en couches. Ainsi, dans ce type de méso-

Modes de vibration

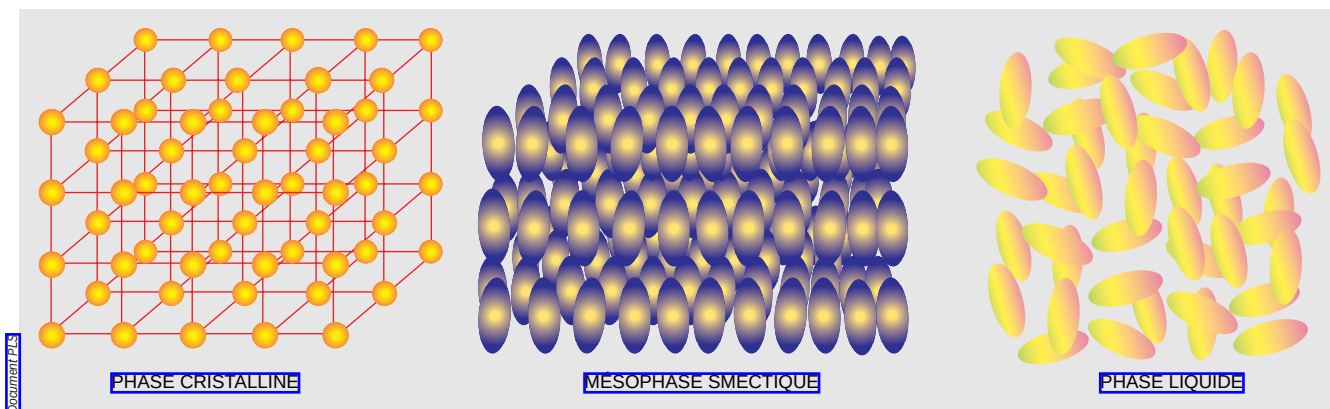


À l'équilibre, la corde et le disque sont en position horizontale. Leurs positions au cours des vibrations sont des «photographies» de la corde ou de la membrane à un instant donné. À chaque dessin correspond un «mode» de vibration possible pour la corde. Un «nœud» est un point qui reste immobile au cours du temps : les deux extrémités de la corde, tout comme le périmètre du disque, sont des nœuds, quel que soit le mode. Un mode est alors caractérisé par le nombre de nœuds qu'il comporte ou de lignes



nodales. On classe ainsi les différents modes d'une corde par nombre de nœuds croissants : le fondamental n'en comporte aucun, le premier harmonique en a un, le deuxième deux, etc. On a ainsi une infinité de modes possibles. Il en est de même des disques où les vibrations modifient les deux dimensions de la surface plane. Un mode de surface est caractérisé par deux nombres.

En pratique, quand une corde ou un disque vibrent, plusieurs modes se superposent.



2. LA MESOPHASE SMECTIQUE a une structure intermédiaire entre le solide et le liquide.

phases, l'ordre cristallin est conservé au moins dans une direction.

Grâce à leur structure lamellaire, les cristaux liquides smectiques forment des films quand on les tend sur des cadres de forme arbitraire, les couches smectiques étant parallèles à la surface du film. Ces films sont analogues aux bulles de savon, à une différence près : une bulle a toujours deux couches de molécules de savon, avec de l'eau à l'intérieur, tandis que les films smectiques sont constitués uniquement des molécules du cristal liquide, et ils peuvent comporter un

nombre arbitraire de couches : les films smectiques sont beaucoup plus stables.

Les films smectiques sont connectés au cadre qui les supporte par l'intermédiaire d'un ménisque, qui est une succession de plages de plus en plus épaisses. La largeur du ménisque est en général négligeable par rapport à la taille du film lui-même.

Une fois tiré, le film ne fluctue pas tel un drapeau sous le vent, mais il reste plat comme la peau d'un tambour. Ce comportement indique la présence d'une certaine tension du film. Toutefois pour un film smectique, contrai-

rement aux cordes d'un instrument de musique, la tension existe de manière intrinsèque ; en revanche, la tension d'une corde peut être réglée, par exemple d'un tour de clef.

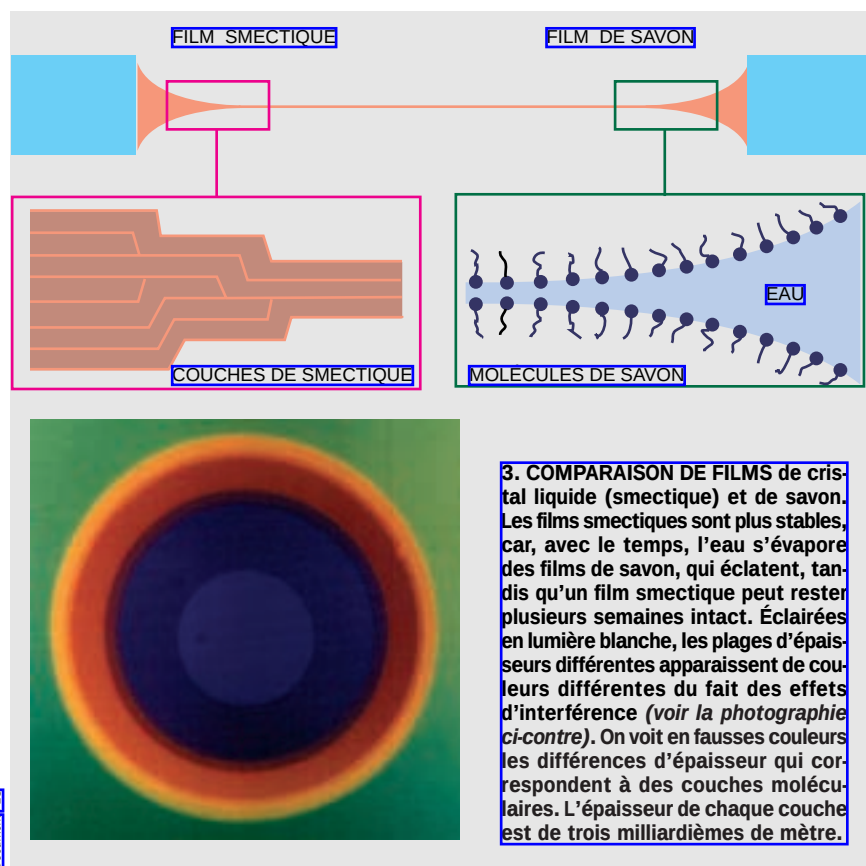
Les films smectiques : des membranes idéales

Un film smectique a une épaisseur comprise entre quelques couches moléculaires et quelques centaines de couches, soit au maximum quelques centaines de nanomètres ; cette grandeur est bien inférieure à sa dimension latérale, qui est de un centimètre environ. En conséquence, on peut négliger son épaisseur, c'est-à-dire le considérer comme un système bidimensionnel ; de plus, sa tension est uniforme.

Ces deux propriétés font du film smectique une membrane idéale, meilleure même qu'une peau de tambour tendue ; en effet, il est très difficile de tendre une peau de tambour de manière à ce que la tension soit parfaitement uniforme. Il est donc très commode d'utiliser un film smectique en tant que membrane vibrante.

Avant d'étudier les vibrations d'un film smectique, intéressons-nous tout d'abord au cas de la corde vibrante, qui constitue un système à une dimension. Sur le dessin de l'encadré page 68, nous avons représenté la position de la corde à l'équilibre (horizontale) et la position de la corde à un instant quelconque où elle vibre (on a ainsi photographié la corde pendant qu'elle vibrait).

Moyennant certaines approximations (amplitude de vibration suffisamment faible), on peut considérer que la trajectoire suivie par un point de la corde est verticale : le petit morceau de corde que l'on considère



3. COMPARAISON DE FILMS de cristal liquide (smectique) et de savon. Les films smectiques sont plus stables, car, avec le temps, l'eau s'évapore des films de savon, qui éclatent, tandis qu'un film smectique peut rester plusieurs semaines intact. Éclairées en lumière blanche, les plages d'épaisseurs différentes apparaissent de couleurs différentes du fait des effets d'interférence (voir la photographie ci-contre). On voit en fausses couleurs les différences d'épaisseur qui correspondent à des couches moléculaires. L'épaisseur de chaque couche est de trois milliardièmes de mètre.

«vibre» ainsi au cours du temps autour de sa position d'équilibre (horizontale). De son point de vue, il subit deux forces qui se compensent : d'une part, sa propre force d'inertie (due à son mouvement) ; d'autre part, il est soumis de la part du reste de la corde à une force, dite de «rappel», qui tend à le ramener vers sa position d'équilibre. Cette force de rappel est due à l'existence d'une tension dans la corde, qui s'oppose aux déformations éventuelles de celle-ci. Elle est proportionnelle à la courbure de la corde au point considéré ; en effet, plus la corde est courbée et plus le point a «envie» de retourner à sa position d'équilibre. Pour poser complètement le problème, il faut tenir compte du fait que la corde est attachée à ses deux extrémités («condition aux limites») : le déplacement de chaque extrémité de la corde est constamment nul au cours du temps.

Traduit en équations, ce problème est toujours soluble. La solution est une onde dite «stationnaire», ce qui signifie que la corde vibre en permanence, mais que cette vibration ne peut pas se propager ailleurs, ce qui est dû au fait que la corde est attachée aux deux extrémités et que sa longueur L est finie. Seules certaines fréquences de vibration sont possibles : on ne peut pas faire vibrer la corde à n'importe quelle fréquence.

Ces fréquences, dites «fréquences propres», sont en nombre infini, et sont des multiples de la fréquence fondamentale. Ce phénomène, bien connu, est à la base du principe de tous les instruments de musique à cordes : piano, violon, guitare, etc.

Remarquons que l'intervalle entre deux fréquences possibles est égal à $c/2L$; si L était infinie, cet intervalle tendrait vers zéro et n'importe quelle fréquence serait possible. Aussi le fait que seules certaines fréquences soient permises est bien dû à la condition aux limites sur les extrémités de la corde.

Vibrations des surfaces

Revenons au cas du film smectique mis en vibration, qui constitue un système à deux dimensions. Nous allons raisonner par analogie avec le cas de la corde, et voir les limites de cette analogie. Nous supposons que le film est infiniment fin et que sa surface est parfaitement plate au repos (ce qui

revient à négliger l'action de la pesanteur sur le film). On s'intéresse dorénavant à un point particulier de la membrane. Moyennant le même type d'approximations que pour la corde («régime linéaire»), on considère que la trajectoire de ce point est perpendiculaire au plan constitué par le film au repos. Ce point de la membrane subit également deux forces qui se compensent : une force d'inertie et une force de rappel. La force de rappel est due à la tension du film et elle est proportionnelle à sa courbure moyenne. La condition aux limites est que le film est attaché au cadre par le ménisque : là encore, les points situés «au bord» du film ne se déplacent jamais au cours du temps.

La solution au problème ainsi posé est encore une onde stationnaire : une solution correspondant à une certaine fréquence propre de vibration du film. La différence par rapport au cas de la corde est que le problème à deux dimensions est en général très difficile à résoudre par le calcul. En effet, la condition aux limites, qui implique une certaine répartition des fréquences propres, dépend de la forme du cadre, qui peut être plus ou moins compliquée. Dans le cas de la corde, le seul paramètre géométrique la définissant est sa longueur, ce qui est beaucoup plus simple.

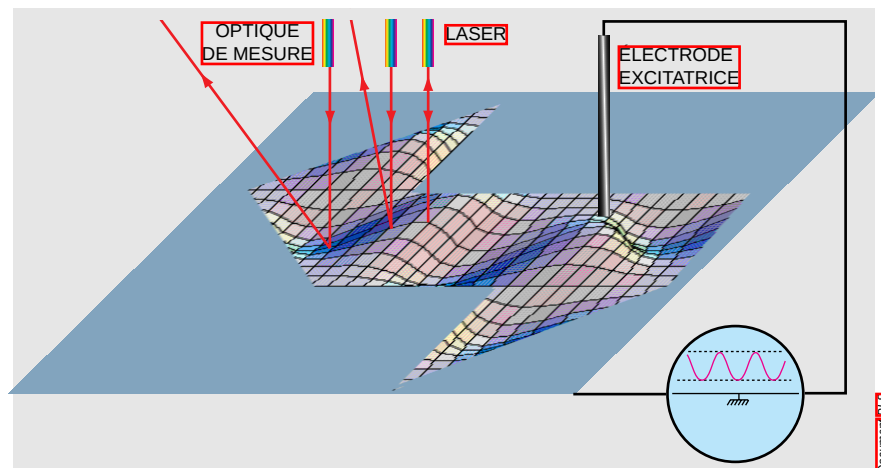
Pour quelques formes géométriques simples, on sait résoudre le problème : par exemple, quand le cadre est rectangulaire, circulaire ou triangulaire. Les fréquences propres, aussi bien dans le cas du carré que dans celui du cercle, ne sont plus réguliè-

èrement espacées. Quand on entend un son formé de certaines des fréquences propres du carré ou du cercle, le résultat ne semble pas harmonieux, car notre oreille n'est pas habituée à des fréquences qui ne sont pas régulièrement espacées (comme c'est le cas pour tous les instruments de musique à cordes). En revanche, n'importe quel son formé de la superposition de certaines fréquences propres d'une corde nous semblerait tout à fait harmonieux.

La répartition des fréquences propres n'est pas identique pour le carré et pour le cercle. La question qui se pose alors naturellement est la suivante : connaissant les fréquences propres, pouvons-nous déterminer la forme de la surface? C. Gordon, D. Webb et S. Wolpert ont répondu par la négative en identifiant un contre-exemple, c'est-à-dire deux contours de formes différentes ayant le même spectre de fréquences propres. Nous les avons nommés «flèche» et «cocotte» en raison de leur forme.

La vérification expérimentale a été faite pour la première fois par S. Sridhar et A. Kudrolli en 1993 : leur expérience utilisait des cavités micro-ondes très aplaties, qui sont des systèmes analogues aux membranes vibrantes. L'expérience que nous avons réalisée au Laboratoire de physique des solides d'Orsay utilise un film smectique de cristal liquide, tendu sur un cadre d'une forme donnée (qui est bien sûr changée au cours des expériences).

L'expérience est réalisée sous vide, pour des raisons aussi bien théoriques que pratiques. En effet, si l'on réali-



4. DISPOSITIFS D'EXCITATION ET DE DETECTION des vibrations d'une membrane. L'excitation est obtenue au moyen d'une électrode. La partie continue de la tension attire les charges de la membrane, qui s'accumulent sous l'électrode. La composante alternative de la tension exerce alors une force électrostatique sinusoïdale. La détection utilise la réflexion d'un faisceau laser sur la surface de la membrane.

Transplantation, cocotte et flèche

La transplantation est une méthode mathématique démontrant que les contours «flèche» et «cocotte» ont les mêmes fréquences propres. A chaque fréquence de vibration de la membrane correspond un mode propre, c'est-à-dire la forme de la membrane à cette fréquence. Cette forme est décrite par la fonction d'onde, une fonction des coordonnées d'espace et de temps qui décrit la forme que prend le film en vibration.

Nous supposons que nous connaissons une fonction d'onde de l'un des deux contours pour une certaine fréquence f ; nous allons construire, à partir de cette fonction d'onde, une fonction d'onde du deuxième contour, pour la même fréquence. Prenons une fonction d'onde Ψ de «flèche», figée par la pensée à un instant donné. Ψ est par définition solution du «problème» évoqué dans le texte, c'est-à-dire de l'équation traduisant l'équilibre des forces agissant sur un point du film – *équation d'onde* – plus les conditions aux limites (Ψ doit s'annuler sur les bords du contour «flèche»). Comment, à partir de Ψ , construire ϕ , solution de l'équation d'onde pour la même fréquence, mais avec la condition que ϕ s'annule, cette fois, sur le contour de «cocotte»? Commençons par un cas particulier simple : choisissons le mode correspondant aux dessins des figures a, b et c. Les deux contours sont constitués de sept triangles comportant chacun un ventre au centre ; la ligne de séparation entre deux triangles et le contour de la forme entière sont des lignes de nœuds. Découpons la fonction d'onde ainsi décrite en sept morceaux correspondant à chacun des triangles.

Collons maintenant ces morceaux sur «cocotte» : on trouve alors la fonction d'onde de «cocotte». On vérifie que cette technique ne donne pas de résultat quand on essaie de les coller sur un contour dont un des triangles est inversé par rapport à «cocotte». Ce procédé fonctionne parce que «cocotte» et «flèche» ont des formes adéquates.

Nous pouvons aussi effectuer ce type d'opération pour un autre mode de vibration de la membrane, dont l'allure ne correspond plus aux figures b et c, et dont les nœuds de vibration ne correspondent plus aux diagonales précédemment décrites. Pour ce faire, nous compliquons un peu le jeu. Nous découpons Ψ (qui n'a plus l'allure des figures a et b) en sept morceaux comme précédemment. La différence est que les lignes entre deux triangles selon lesquelles on coupe ne sont plus des lignes de nœuds *a priori*. Appelons $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_7$ les sept morceaux de Ψ (voir les figures d et e). La difficulté est qu'il ne suffit plus maintenant de coller les morceaux sur «cocotte» pour

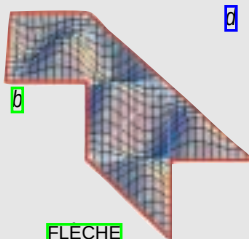
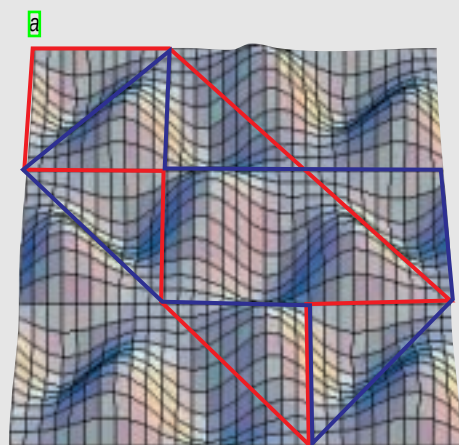
obtenir une fonction d'onde de celle-ci. Il faut effectuer trois collages, avec certains morceaux de Ψ qu'on a renversés (d'où les signes moins). La fonction ϕ est également découpée en sept morceaux numérotés de 1 à 7. Ainsi ϕ est égale à $\Psi_5 - \Psi_4 - \Psi_7$ sur le triangle en haut à gauche, à $\Psi_6 - \Psi_3 + \Psi_7$ sur le triangle juste en dessous, etc. Avant ces additions, on a fait coïncider les pourtours de couleurs des triangles, comme indiqué sur la figure f. Pourquoi cette opération? Pour que les conditions aux limites soient satisfaites.

La fonction ϕ ainsi construite doit s'annuler sur le contour de «cocotte». Considérons le triangle en haut à gauche de «cocotte», c'est-à-dire ϕ_1 . Cette partie de ϕ doit s'annuler sur les bords bleu et rouge du triangle considéré. Pour voir si c'est le cas, reportons-nous au dessin de «flèche» : on a $\Psi_5 = \Psi_4$ sur le bord bleu (Ψ est une fonction continue), donc $\Psi_5 - \Psi_4 = 0$; de plus, Ψ_7 s'annule sur le bord bleu, donc $\phi_1 = \Psi_5 - \Psi_4 - \Psi_7$ est bien nulle sur le bord bleu. Sur le bord rouge, $\Psi_5 = \Psi_7$ et $\Psi_4 = 0$, donc ϕ_1 s'annule bien sur ce bord-là également. On peut ainsi vérifier que chaque «restriction» de ϕ aux sept triangles de «cocotte» est bien nulle sur le contour.

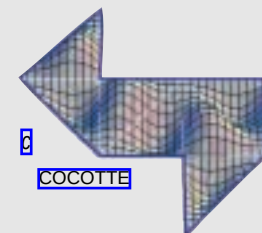
Mais il y a une condition supplémentaire : la fonction ϕ , de même que Ψ , doit être une fonction continue, et ce notamment à la limite entre deux triangles. De plus, sa dérivée doit être également continue, afin d'assurer un raccord de pente «lisse» lors de l'opération de collage. Vérifions ce point pour ϕ_1 et ϕ_2 , c'est-à-dire l'égalité entre ϕ_1 et ϕ_2 , mais aussi entre leurs dérivées, sur le bord vert. Sur ce bord (voir à nouveau le dessin de «flèche»), $\Psi_5 = \Psi_3$, $\Psi_4 = \Psi_6$, et $\Psi_7 = 0$. La continuité de ϕ lors du passage de la «frontière» verte est alors assurée, tout comme celle de sa dérivée par le fait que Ψ_7 change de signe lors de ce passage, ce qui «renverse» la fonction et assure ainsi la continuité de la pente.

La fonction ϕ convient donc : elle a les propriétés de continuité requises pour une fonction d'onde, et nous avons réussi à la construire à partir d'une fonction d'onde de l'autre contour, pour une certaine fréquence propre f de ce dernier. Le fait que ϕ vibre à la même fréquence que Ψ peut se comprendre : nous n'avons fait que superposer des morceaux de Ψ vibrant tous à cette même fréquence f . En réalité, pour justifier que l'on a effectivement le droit d'effectuer cette superposition, il faut invoquer un argument de linéarité de l'équation d'onde, que nous passons sous silence ici.

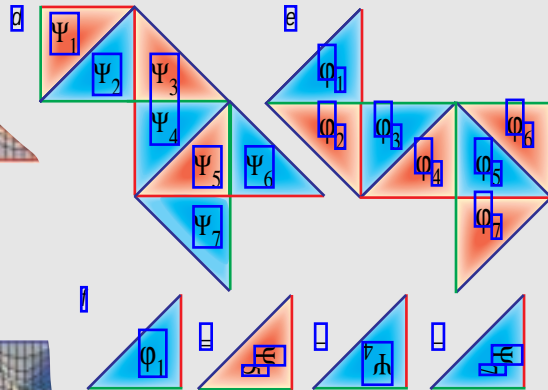
La méthode décrite ici a été inventée par le mathématicien P. Buser, et adaptée à ces deux contours par un autre mathématicien, P. Bérard.



FLECHE



COCOTTE



$$\begin{aligned}\phi_1 &= \Psi_5 - \Psi_4 - \Psi_7; \quad \phi_2 = \Psi_6 - \Psi_3 + \Psi_7; \\ \phi_3 &= \Psi_5 - \Psi_2 - \Psi_6; \quad \phi_4 = \Psi_6 - \Psi_1 + \Psi_4; \\ \phi_5 &= \Psi_1 + \Psi_3 + \Psi_5; \quad \phi_6 = \Psi_2 - \Psi_3 + \Psi_4; \quad \phi_7 = -\Psi_1 + \Psi_2 + \Psi_7\end{aligned}$$

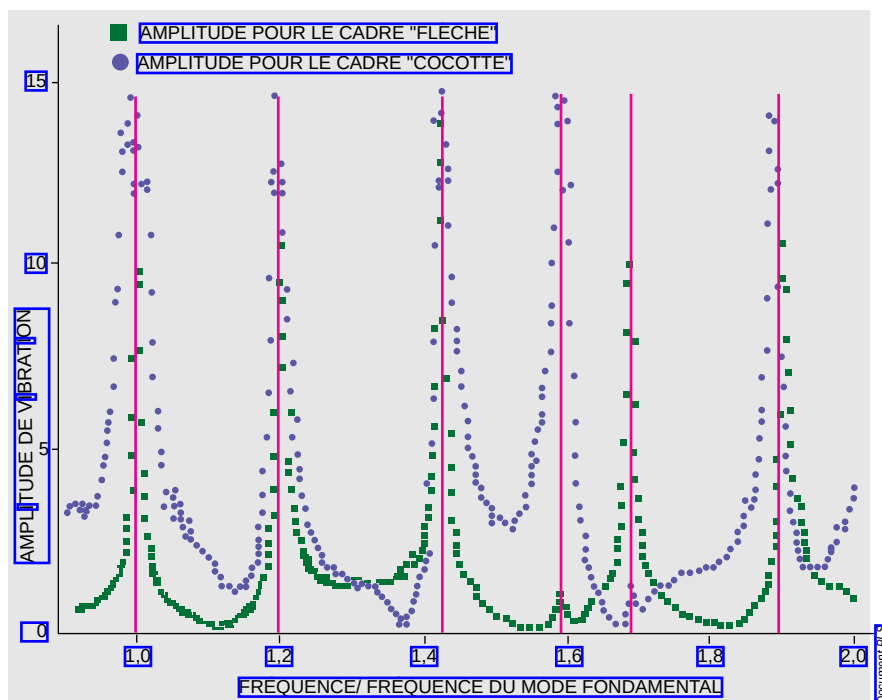
sait l'expérience dans l'air, ce dernier serait également mis en vibration, de sorte qu'il modifierait la vibration du film. De plus, un film sous vide a une durée de vie bien supérieure. L'inconvénient est qu'on ne peut pas exciter des ondes sonores à l'aide d'un haut-parleur dans le film mis sous vide. On utilise donc un dispositif d'excitation électrique, et ponctuel : il s'agit d'une électrode placée au-dessus du film. Le système de détection des vibrations du film est également ponctuel : on utilise en effet la réflexion d'un faisceau laser sur le film.

Nous avons donc tendu des films sur des cadres ayant la forme de «flèche» et de «cocotte». La figure 5 représente une courbe obtenue expérimentalement. On voit que les deux séries de pics d'amplitude (correspondant aux fréquences propres) pour «flèche» et pour «cocotte» se correspondent bien. Certains pics n'apparaissent que très écrasés : le mode correspondant est soit mal excité, soit mal détecté.

Effet Beg-Rohu

Ainsi, nous avons observé le comportement d'un film en vibration dans le régime linéaire, où nous avons adopté l'approximation que les trajectoires des points du film sont verticales. Cela revient à négliger la valeur de l'amplitude de vibration devant la taille du film. Lorsque les deux sont du même ordre de grandeur, le film se casse telle une corde trop tirée (néanmoins les cordes, étant plus rigides, se brisent plus difficilement). Mais quel est le comportement du film en vibration dans le cas intermédiaire, lorsque l'amplitude est très petite, mais non négligeable par rapport à la dimension du film ?

En réalité, les trajectoires des points d'un film en vibration sont toujours légèrement courbées, et cette courbure est d'autant plus importante que l'amplitude de vibration est grande. La force centrifuge agit sur chaque corps se déplaçant sur une courbe et tend à le ramener vers une trajectoire rectiligne. Cette force lutte par exemple contre l'effet de gravitation et empêche les planètes en rotation de tomber sur le Soleil. Dans le cas des films smectiques, cette force a été baptisée force non linéaire. Cette force est proportionnelle à l'épaisseur



5. CES DEUX COURBES OBTENUES EXPÉRIMENTALEMENT correspondent aux cadres «flèche» et «cocotte». Une courbe représente l'amplitude de la déviation du faisceau laser réfléchi en un point donné du film en fonction de la fréquence d'excitation. Une fréquence propre de vibration correspond à un pic sur le graphe. On voit que les deux séries de pics correspondent aux deux cadres. Cependant, certains pics de «flèche» sont très écrasés pour «cocotte» et réciproquement. Cela est dû aux deux dispositifs d'excitation et de détection, qui sont ponctuels : certains modes sont mal excités, ou alors on a mis la détection au «mauvais endroit» pour l'un des modes.

du film, et inversement proportionnelle au rayon de courbure de la trajectoire de l'élément du film. Comme le rayon de courbure change d'un point à un autre, la force non linéaire n'est pas homogène. Ainsi, si l'épaisseur du film n'est pas uniforme, les plages plus épaisses sont entraînées vers les «ventres» du film en vibration où les trajectoires sont les moins courbées.

L'intérêt des expériences utilisant des films smectiques est leur grande maniabilité. De plus, ils constituent de véritables membranes sans qu'aucune analogie soit nécessaire, comme dans le cas des cavités micro-ondes. En

outre, les équations qui déterminent les fréquences propres de vibration sont analogues à l'équation de Schrödinger bidimensionnelle. Ainsi, la forme du film en vibration peut être «associée» à la fonction d'onde d'une particule quantique évoluant dans un puits de potentiel.

Les problèmes abordés dans cet article concernaient les films smectiques composés de couches liquides. Il existe également d'autres types de smectiques ; les différences entre ces mésophases se manifestent dans la force de rappel. Ainsi, en écoutant les vibrations du film, on peut «entendre» sa structure.

Maria BRAZOVSKAIA, Catherine EVEN et Pawel PIERANSKI sont chercheurs au Laboratoire de physique des solides, à Orsay.

P. PIERANSKI et al, *Phys. A*, vol. 194, n° 364, 1993.

J.W. RAYLEIGH, *The Theory of Sound*, Dover Publishing Inc., 1945.

M. KAC, *Am. Math. Monthly*, vol. 73, n° 1, 1966.

C. GORDON et D. WEBB, *You Can't Hear*

the Shape of a Drum, in *American Scientist*, janvier-février 1996.

S. SRIDHAR et A. KUDROLLI, *Phys. Rev. Letters*, vol. 72, n° 2175, 1994.

M. ALBERTINI, J-C. LACOUTURE et X. POUDRET, stage effectué au Laboratoire de physique des solides, 1996.

M. BRAZOVSKAIA, H. DUMOULIN et P. PIERANSKI, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, 1996.

Isabelle KRAUS, thèse de doctorat, Orsay, 1995.

La communication des bactéries

RICHARD LOSICK • DALE KAISER

Les bactéries échangent des messages chimiques entre elles, ainsi qu'avec les plantes et les animaux. Ce besoin de communiquer expliquerait l'extraordinaire variété des molécules synthétisées par les micro-organismes.

« Le matin du 4 juin, j'ai observé une abondance de créatures vivantes et, en regardant de nouveau l'après-midi du même jour, j'ai trouvé nombre d'entre elles dans une seule goutte d'eau... Lorsqu'on les regardait à travers le microscope, elles ressemblaient à des grains de sable vus à l'œil nu. » C'est en ces termes qu'en 1676, le naturaliste hollandais Antonie van Leeuwenhoek décrit ce qui était probablement l'une des premières observations de bactéries jamais réalisées.

Le microscope rudimentaire de Leeuwenhoek, constitué d'une seule lentille, permettait tout juste de discerner les bactéries. Aujourd'hui, les biologistes savent que les bactéries, qui sont parmi les occupants de la Terre les plus anciens et les plus abondants, ont une structure très simple. Vues au microscope électronique, elles ne semblent être que de petits récipients rigides, emplis d'ADN et de cytoplasme, tandis que les cellules de la plupart des autres organismes vivants renferment des structures élaborées, telles qu'un noyau, un réseau complexe de fibrilles organisées en un échafaudage interne, ainsi que des mitochondries, organites spécialisés dans la production d'énergie.

Malgré leur simplicité structurelle, les bactéries manipulent merveilleusement leur environnement. Leur adaptabilité s'observe nettement lorsqu'on examine leurs communications, soit entre elles, soit avec les organismes supérieurs. Ces interactions, matérialisées par l'échange de molécules spéciales, ne provoquent parfois que

de minimes changements de comportement, mais on découvre également des cas où les modifications sont spectaculaires.

Des signaux lumineux

Depuis longtemps, les biologistes savent que les bactéries vivent en colonies. Cependant, ils pensaient naguère que les membres de ces colonies agissaient individuellement, sans se préoccuper de leurs congénères. Désormais, on sait que la plupart des bactéries, sinon toutes, communiquent. Nous examinerons ici quelques exemples de communication parmi les mieux connus et les plus intrigants.

La première observation de la communication entre bactéries fut effectuée par des biologistes marins, qui étudiaient des bactéries marines luminescentes : en 1970, à l'Université Harvard, Kenneth Nealson et John Woodland Hastings remarquèrent que les bactéries luminescentes de leurs cultures n'émettaient pas toujours la même quantité de lumière ; en outre, elles n'émettaient de la lumière que lorsque leur densité était suffisante.

K. Nealson et J.W. Hastings savaient que l'émission de lumière résultait de réactions chimiques catalysées par une enzyme nommée luciférase. Ils supposèrent que la production de cette enzyme était commandée, non par un mécanisme propre à chaque cellule, mais par un message chimique échangé entre les cellules : une fois entrée dans les cellules cibles, cette molécule, nommée auto-inducteur, aurait déclenché l'expression des gènes codant la luci-

férase et d'autres protéines qui interviennent dans la production de lumière. Autrement dit, l'auto-inducteur aurait stimulé la synthèse des protéines codées par le génome bactérien, et déclenché ainsi la production de lumière. Leur hypothèse, d'abord accueillie avec scepticisme, a été vérifiée et étendue.

En effet, les biologistes ont identifié l'auto-inducteur et ils ont montré que celui-ci peut diffuser des cellules bactériennes jusqu'à leur environnement, puis de ce milieu jusqu'à l'intérieur d'autres bactéries où il active une protéine nommée LuxR ; cette protéine stimule alors l'expression des gènes qui interviennent dans la luminescence. Aucune lumière n'est cependant émise aux faibles concentrations en auto-inducteur : le milieu doit contenir un nombre suffisant de bactéries pour que la concentration soit supérieure à un seuil à partir duquel l'auto-inducteur active la protéine LuxR ; celle-ci stimule alors l'expression des gènes codant la luciférase, les autres molécules qui participent à la production de lumière, ainsi que la synthèse d'auto-inducteur. Ainsi, ce cycle de synthèse protéique est auto-entretenu : l'auto-inducteur, en intervenant dans sa propre synthèse, conduit à une croissance rapide de sa quantité et, finalement, à une émission de lumière.

Quel avantage les bactéries marines ont-elles à échanger un auto-inducteur ? Ces bactéries et certains poissons et calamars le révèlent. Le calamar *Euprymna scolopes*, par exemple, laisse proliférer dans son organe lumineux

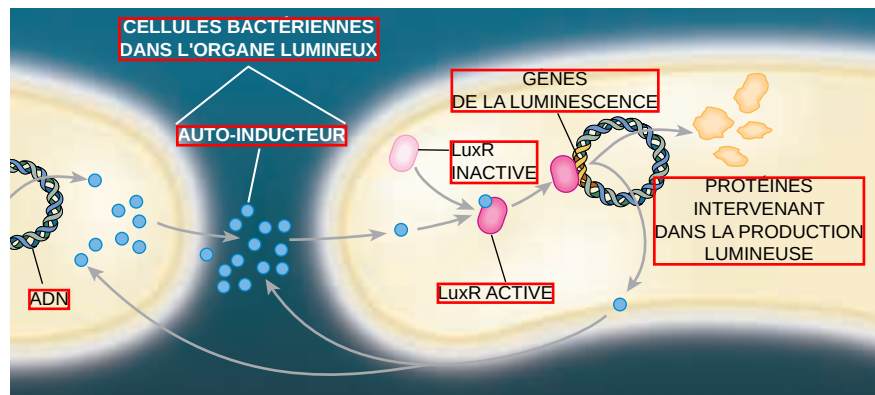
la bactérie *Vibrio fischeri* qu'il a sélectionnée parmi toutes les autres espèces marines. Lorsque ces bactéries sont dispersées dans l'océan, leur concentration est très faible, ainsi que celle de leur auto-inducteur : ces micro-organismes n'émettent alors aucune lumière. Toutefois, lorsque ces cellules bactériennes prolifèrent dans l'organe lumineux du calamar, l'auto-inducteur s'accumule à des concentrations telles que la lumière est produite.

Le calamar, qui chasse surtout la nuit, bénéficie de la présence des bactéries lumineuses, car elles lui permettent d'échapper aux prédateurs qui nagent sous lui : la lueur émise ressemble à celle de la Lune et efface l'ombre que la lumière lunaire produit lorsqu'elle éclaire le calamar par le haut. L'association profite également aux bactéries qui trouvent, dans l'organe lumineux du calamar, protection et nourriture. Le système d'auto-induction évite les gaspillages d'énergie : c'est seulement lorsque la concentration en auto-inducteur est suffisante que les bactéries «savent» qu'elles sont regroupées dans un espace clos ; elles peuvent alors émettre de la lumière, parce que l'énergie qu'elles dépensent est restituée par le calamar.

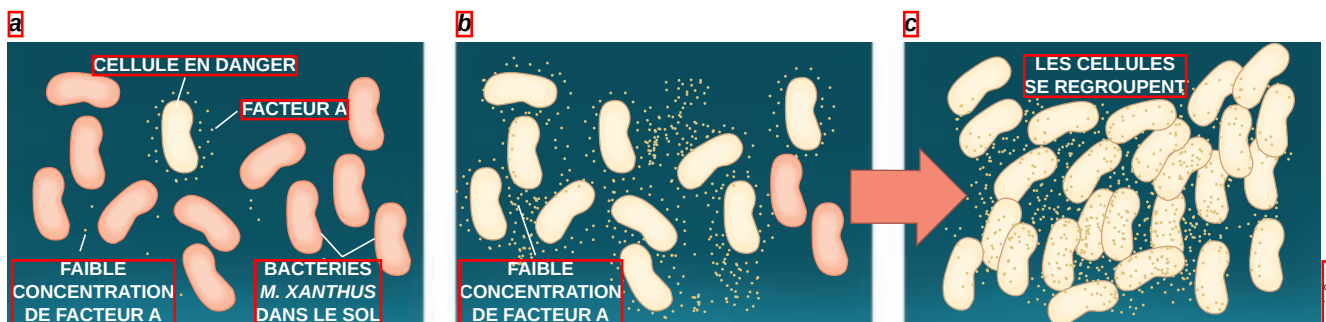
L'auto-inducteur appartient à une famille de petites molécules nommées lactones de l'homosérine. On sait aujourd'hui que des bactéries variées utilisent ces molécules pour évaluer la concentration de leur population. Les raisons pour lesquelles les bactéries peuvent évaluer leur densité ne sont pas toujours claires mais, comme dans le cas de *Vibrio fischeri*, cette densité détermine souvent le comportement des communautés.

L'esprit des spores

Chez *Vibrio fischeri*, la communication entre bactéries ne modifie ni la forme ni le comportement des individus. En revanche, l'émission de signaux chimiques s'accompagne de modifications spectaculaires de la structure et de l'activité des myxobactéries. Ces dernières sont des bâtonnets mobiles qui colonisent les sols. Elles croissent généralement de manière indépendante. Cependant, lorsque les ressources en eau ou en nutriments se raréfient, des milliers de cellules de la même espèce s'agglutinent pour former des structures multicellulaires nommées corps fructifère. Alors que



1. CE CALAMAR de l'espèce *Euprymna scolopes* (en haut) a été ouvert par sa face inférieure : on voit son organe lumineux (en forme de papillon, près du centre), qui doit ses propriétés lumineuses aux bactéries lumineuses de l'espèce *Vibrio fischeri* qui les colonisent. Ces micro-organismes se mettent à briller après en avoir reçu l'ordre par un auto-inducteur (en bleu sur le diagramme), un messager qui diffuse entre les cellules bactériennes. Des concentrations élevées en auto-inducteur activent la protéine LuxR ; celle-ci stimule des gènes qui codent les protéines directement responsables de la production de lumière et provoque la synthèse d'une grande quantité d'auto-inducteur, lequel stimulera aussi bien les cellules qui le produisent que les cellules voisines.



2. LES BACTERIES DU SOL de l'espèce *Myxococcus xanthus* vivent en petits groupes d'individus tant que les ressources alimentaires sont suffisantes. Lorsque celles-ci s'amenuisent et que les cellules commencent à souffrir d'inanition, elles signalent leur détresse en sécrétant une substance chimique nommée facteur A. Une faible concentration en facteur A (a) n'a que peu d'effets sur une population bactérienne, mais lorsque cette concentration dépasse une valeur seuil (b), cette

concentration indique à la population qu'elle est en danger et incite les cellules bactériennes à se regrouper (c) pour former un corps fructifère (séquence de microphotographies sur la page suivante). De tels corps fructifères contiennent jusqu'à 100 000 spores, qui résistent à un manque de nourriture. Ces spores sont alors transportées en bloc par le vent ou par un animal vers des zones plus favorables, où elles peuvent germer et établir une nouvelle colonie.

les cellules et les spores bactériennes sont de taille microscopique, les corps fructifères sont suffisamment gros pour être vus à l'œil nu ; ils se présentent sous l'aspect de points brillants, jaunes, rouges ou verts, qui couvrent la végétation en décomposition ou l'écorce des arbres.

Certaines de ces structures sont si complexes que les myxobactéries furent un temps considérées comme des champignons, organismes de rang supérieur dans l'échelle de l'évolution. Les corps fructifères permettent à des milliers de spores – des cellules à paroi épaisse, résistant à la chaleur, à la dessiccation et au jeûne prolongé – d'être entraînées par le vent, par l'eau ou par des animaux de passage vers des lieux plus cléments, où elles établiront de nouvelles colonies.

Aussi étrange que cela paraisse, la plupart des cellules qui participent à l'élaboration des corps fructifères semblent se sacrifier pour assurer la formation de spores qui survivront et se reproduiront.

Depuis dix ans, les biologistes étudient certains signaux chimiques qui commandent la formation des corps fructifères chez une bactérie fascinante : *Myxococcus xanthus*. Après quatre heures de jeûne, les cellules en forme de bâtonnet de *Myxococcus xanthus* migrent de différents endroits de la communauté bactérienne et se rassemblent en des foyers. Quelque 100 000 cellules bactériennes s'accumulent ainsi en chacun de ces points de rassemblement et forment un monticule doré (*xanthus* signifie « doré ») qui peut atteindre un dixième de millimètre de hauteur, soit l'épaisseur d'un cheveu. Une vingtaine d'heures après le début du jeûne, certaines cellules de ce monticule commencent

à se différencier en spores, et l'assemblage de la structure est complet au bout de 24 heures.

Des facteurs commandent l'aggrégation

Le facteur A et le facteur C sont deux des messagers chimiques les mieux connus de ceux qui commandent la formation des corps fructifères chez *Myxococcus xanthus*. Le facteur A permet aux cellules bactériennes de s'agréger en foyers, et le facteur C les aide à terminer leur agrégation et à former des spores.

Comme l'auto-inducteur et les autres lactones de l'homosérine, le facteur A est un signal de concentration de cellules. Il est libéré dans l'environnement immédiat des cellules et ne commande l'aggrégation que lorsqu'un seuil de concentration est atteint. Il constitue une sorte de signal d'alarme, émis par les cellules qui souffrent d'inanition. Quand peu de bactéries s'assemblent, sa concentration moyenne reste faible, et la population bactérienne en déduit que l'environnement contient assez de ressources alimentaires pour assurer la croissance des cellules sous leur forme individuelle. En revanche, quand un nombre suffisant de cellules émettent ce signal, sa concentration avertit l'ensemble de la communauté bactérienne qu'elle est en danger et que le rassemblement en corps fructifères s'impose. La régulation est précise : le nombre de cellules qui doivent sécréter le facteur A pour déclencher l'aggrégation en un corps fructifère correspond au nombre minimal de cellules nécessaires à la formation d'un corps fructifère mature, qui produira des spores.

Le facteur C, qui est une petite protéine, intervient après que le manque

de substances nutritives a été évalué et reconnu, et que le phénomène d'aggrégation a commencé. Contrairement au facteur A, il reste lié à la cellule qui l'a synthétisé et dépasse de la surface. Un tel message n'est transmissible qu'entre des cellules mobiles. Pourquoi cette particularité ? Parce que cet organisme doit être transporté vers les milieux où il dispose de nourriture. La probabilité qu'un corps fructifère soit emporté et qu'il établisse une nouvelle colonie florissante est d'autant plus élevée que les spores sont nombreuses et que leur densité dans un corps fructifère est grande. Pour que des cellules puissent s'entasser de manière aussi compacte que possible, elles doivent se toucher par leurs côtés et par leurs pointes ; ces contacts ne peuvent s'établir sans mouvements.

Une fois les cellules alignées, le facteur C qui dépasse de la surface des cellules en contact informe les autres cellules de la réussite de l'opération. Lorsque le message dû au facteur C est intense, la communauté bactérienne sait qu'elle a atteint une densité maximale. Les cellules s'immobilisent alors et activent les gènes de formation des spores.

Une autre transmission importante de signaux a été mise en évidence chez d'autres bactéries du sol, les streptomycètes. Ces dernières sont la source de nombreux antibiotiques et de divers médicaments, tels que l'ivermectine (qui tue les parasites) et le FK506 (qui évite les rejets de greffe). Ce sont aussi ces micro-organismes qui donnent aux forêts leur bonne odeur de terre.

Les colonies de streptomycètes poussent en formant un réseau composé de longues cellules en forme de fibre, ou hyphes, qui ressemblent beaucoup à certains champignons fila-

menteux. Ces hyphes pénètrent dans la végétation, qu'ils dégradent, et se nourrissent de matière en décomposition. Lorsque la nourriture vient à manquer, la communauté, comme celle de *Myxococcus xanthus*, coopère pour produire des spores – qui se forment dans le cas présent dans une structure spécialisée nommée mycélium aérien.

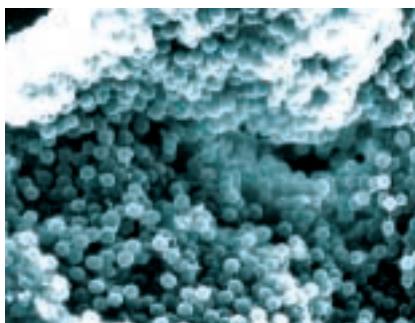
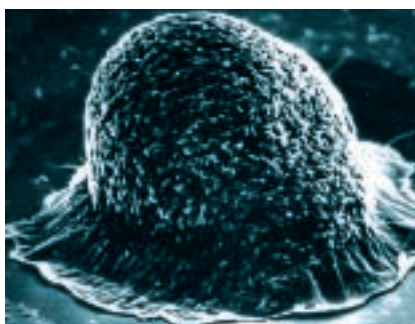
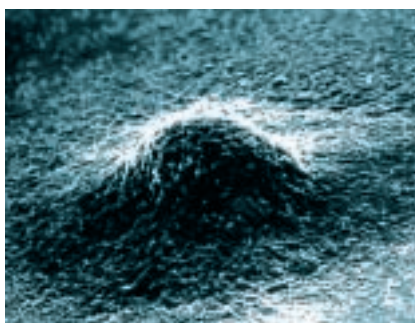
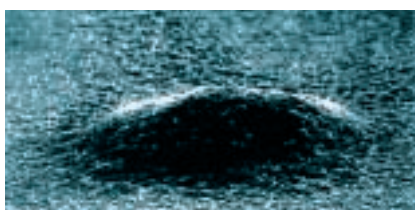
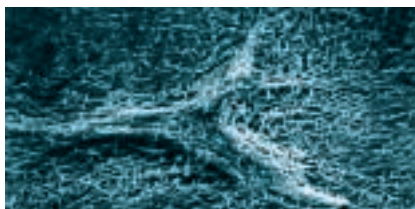
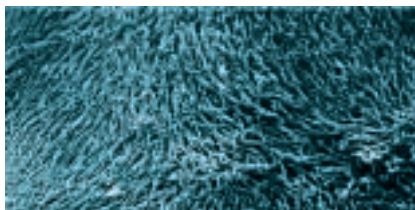
La constitution de ce mycélium aérien commence par l'apparition de nombreux hyphes, qui se dressent hors de la colonie. Ces hyphes donnent à la colonie un aspect blanc duveteux. Chacun d'entre eux, constitué initialement d'une seule cellule allongée, se cloisonne et se différencie en une longue chaîne de spores à paroi épaisse, qui ressemble à un collier de perles. Ces spores, dont la formation dure plusieurs jours, se pigmentent à la fin de leur cycle de maturation et colorent la surface duveteuse de la colonie.

Des échanges actifs de signaux chimiques, à l'intérieur de la communauté bactérienne, semblent gouverner le redressement des hyphes aériens. L'un des signaux les mieux étudiés ressemble aux molécules de la famille des lactones de l'homosérine. Apparemment, ce signal favorise la formation des hyphes aériens lorsqu'un nombre suffisant de ces colonisateurs du sol détectent une chute des réserves de nourriture.

Les cellules des hyphes coopèrent également en sécrétant la SapB, une petite protéine qui s'accumule à l'extérieur des cellules. En 1990, à Harvard, Joanne Wiley a découvert que les protéines SapB semblent participer directement à l'édification des hyphes aériens : elles recouvrent la surface des colonies et semblent aider les filaments les plus élevés à rompre la tension de surface pour s'élever du sol. Ainsi le redressement des hyphes aériens s'apparente-t-il à une entreprise communautaire au cours de laquelle les cellules coordonnent leurs activités grâce à l'échange et à l'accumulation de divers composés.

Conversation avec des supérieurs

Outre les contacts qu'elles ont avec leurs congénères, les cellules bactériennes interagissent parfois avec les organismes supérieurs par l'intermédiaire de signaux chimiques. Nous avons vu comment les bactéries luminescentes de l'espèce *Vibrio*



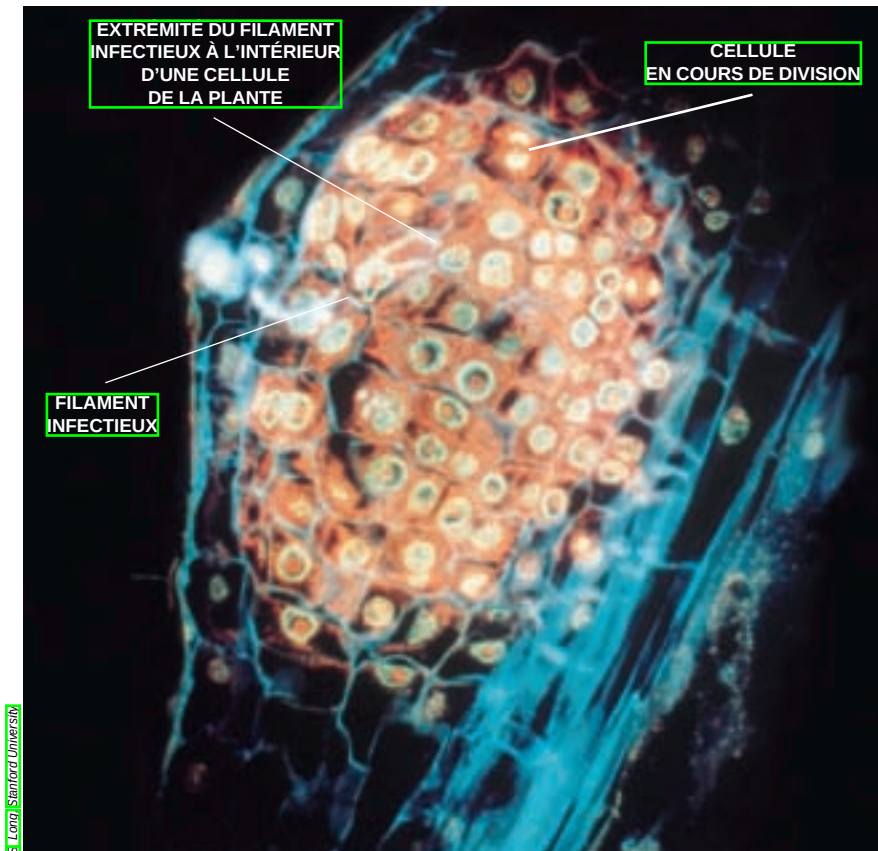
3. CE CORPS FRUCTIFERE de *Myxococcus xanthus*, très grossi, fait apparaître les spores qu'il contient. La formation des spores est commandée par une molécule nommée facteur C.

fischeri émettent de la lumière dans l'organe lumineux du calamar. Ces mêmes micro-organismes stimulent également la maturation de l'organe lumineux. Lorsque de jeunes calamars sont élevés dans de l'eau de mer stérile, leur organe lumineux n'arrive jamais à maturation. Un signal chimique de la bactérie semble commander cette maturation (il n'a pas encore été isolé).

Les biologistes ont aussi beaucoup appris sur la transmission de signaux par des bactéries qui facilitent le développement de certaines plantes. Certaines bactéries du sol s'engagent en effet dans une relation symbiotique avec des légumineuses (tels les pois, les lentilles et les haricots). Ces bactéries sont du genre *Rhizobium*, et leur association avec les légumineuses contribue aux échanges d'azote entre le sol et l'atmosphère.

L'azote est un élément indispensable à toutes les formes de vie, mais rares sont les organismes capables d'assimiler et d'incorporer l'azote moléculaire (N_2) dans leurs tissus : l'incorporation de l'azote atmosphérique dans les cellules nécessite la rupture de la liaison chimique forte qui lie les deux atomes de la molécule d'azote. Dans la nature, seules quelques espèces bactériennes spécialisées réalisent cette fixation de l'azote : ces bactéries fixatrices d'azote sont un maillon fondamental de la vie sur le Globe, car elles seules assurent le passage de l'azote de l'atmosphère à la biosphère (notre espèce renforce l'action de ces bactéries en fabriquant les nitrates, qui procurent de l'azote aux végétaux).

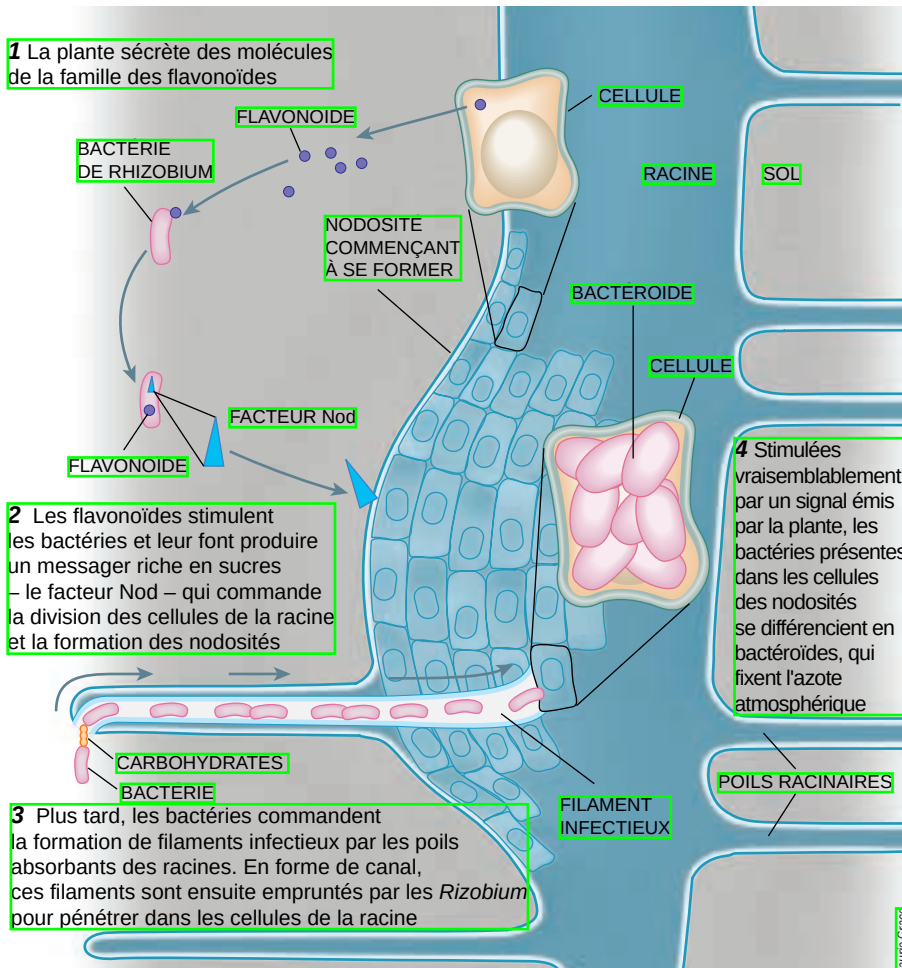
Isolées, les cellules de *Rhizobium* sont incapables de fixer l'azote. Elles n'effectuent cette tâche fondamentale qu'après avoir colonisé une légumineuse : les bactéries présentes dans le sol commencent par envahir de minuscules poils absorbants qui se trouvent à la surface des racines ; puis elles migrent dans les profondeurs du tissu racinaire et s'installent dans des nodosités, structures spécialisées que la plante construit pour elles. Là, les bactéries subissent une série de transformations morphologiques spectaculaires : elles s'arrondissent et grossissent tout en se différenciant en centres de fixation d'azote, les bactéroïdes. La symbiose profite aux deux espèces : les bactéroïdes fournissent aux plantes une forme d'azote directement assimilable (de l'ammoniac),



et la plante leur fournit la nourriture nécessaire sous la forme de sucres.

Les modifications profondes des micro-organismes et de leur hôte sont commandées par une communication moléculaire à deux sens qui commence avant même que la bactérie et la plante n'entrent en contact. La plante émet une molécule de la famille des flavonoïdes qui pénètre dans les cellules bactériennes et stimule une protéine régulatrice. Cette dernière active alors certains gènes de «nodulation», qui participent à la formation des nodosités par la plante.

De nombreux biologistes ont examiné la réaction des bactéries et montré comment les gènes de nodulation des cellules de *Rhizobium* produisent une réaction chez la plante. Les protéines codées par certains gènes de nodulation sont des enzymes qui synthétisent une molécule complexe, le facteur Nod, avec une partie lipidique et une partie riche en sucre. Cette molécule déclenche dans la plante les divisions cellulaires nécessaires à la formation des nodosités qui abriteront les bactéroïdes.



4. LES NODOSITÉS qui se forment sur les racines du pois (ci-dessus) contiennent des bactéries du genre *Rhizobium*, qui fixent l'azote atmosphérique (N_2) et le convertissent en une forme utilisable par la plante. En échange, la plante abrite et nourrit les bactéries. La formation de ces nodosités et leur colonisation par les bactéries résultent de communications chimiques entre les racines et les bactéries (schéma de gauche). Dans la jeune nodosité qui s'est formée sur une racine de luzerne (en haut, à gauche), on voit des cellules en cours de division et un canal que les bactéries empruntent pour envahir la racine.

Plus tard, lorsque les cellules de *Rhizobium* entreront en contact avec les poils des racines, les bactéries stimuleront ceux-ci pour produire des canaux, nommés filaments infectieux. Les sucres complexes qui couvrent les cellules de *Rhizobium* permettront alors aux bactéries de s'introduire dans ces canaux et de coloniser les racines. Il ne serait pas surprenant de découvrir que les nodosités réagissent à leur tour en produisant des signaux qui commandent la transformation des bactéries envahisseuses en bactéroïdes capables de fixer l'azote atmosphérique. Ainsi, l'échange des signaux s'effectue dans les deux sens. Les bactéries et leur hôte se stimulent mutuellement pour franchir les étapes successives d'un mécanisme qui règle le développement des deux organismes.

Des signaux dangereux

Les échanges de signaux entre les bactéries et les organismes supérieurs n'aboutissent pas toujours à un bénéfice mutuel. Tout comme les bactéries symbiotiques, celles qui provoquent des maladies transmettent des signaux qui commandent aux cellules de leur hôte de modifier leur comportement. Cependant, les signaux émis par les bactéries pathogènes suscitent des réactions qui nuisent à l'organisme infecté, ce qui affaiblit ses défenses et permet aux pathogènes de proliférer. *Yersinia pestis*, la bactérie de la peste bubonique, a ainsi décimé une grande partie de la population européenne au XIV^e et au XV^e siècle, grâce à une tactique subtile.

Yersinia pestis, qui provoque encore aujourd'hui des épidémies localisées, infecte les tissus lymphoïdes de l'homme et sape l'activité des cellules immunitaires nommées lymphocytes. Elle vainc le système immunitaire parce qu'elle échappe tout d'abord aux macrophages, qui sont des cellules de voirie de l'organisme : les macrophages absorbent et détruisent les bactéries pathogènes et contribuent également à la stimulation d'autres parties du système immunitaire. *Yersinia pestis* échappe à leurs assauts en produisant des protéines qui pénètrent dans les macrophages et les désarment : certaines de ces protéines endommagent directement les macrophages, et d'autres, telles que YopH, préviennent les attaques en interférant avec le réseau de communications entre les macrophages.

Comme les colonies de bactéries que nous avons déjà évoquées, les organismes supérieurs multicellulaires disposent de systèmes de signalisation internes, qui permettent aux cellules de communiquer. Les molécules de signal variées, telles les hormones, se fixent sur des récepteurs présents à la surface de certaines cellules cibles. Ces récepteurs transmettent le signal provenant de l'extérieur à des molécules à l'intérieur de la cellule, où il est relayé jusqu'au noyau. Dans le noyau, le signal modifie alors l'expression des gènes, ce qui entraîne une modification des activités de la cellule. La transduction du signal est le transfert de l'information de l'extérieur à l'intérieur des cellules.

Un composant fondamental de nombreuses voies de transduction, notamment dans les macrophages, est le greffage de groupes phosphate à des molécules spécifiques de la chaîne de communication : cette réaction de «phosphorisation», due à des enzymes, active généralement des protéines qui participent à la transduction. À l'Université Purdue, Jack Dixon découvrit que la protéine YopH appartient à une classe d'enzymes qui enlève les groupes phosphate ; la protéine désorganise vraisemblablement la voie de transduction du signal dans les macrophages et empêche ces cellules de réagir à l'infection par *Yersinia pestis*.

De surcroît, certaines espèces de *Yersinia* détournent les systèmes de transduction du signal d'autres types de cellules pour leurs propres besoins. Par exemple, certaines souches de *Yersinia* doivent traverser les cellules intestinales pour coloniser les ganglions lymphatiques de l'intestin de leur hôte. Ces bactéries activent souvent des systèmes de transduction du signal, qui les véhiculent jusque dans les cellules intestinales.

Les bactéries activent ces voies en produisant une protéine nommée invasine, qui possède la propriété de se fixer à un récepteur de la cellule hôte. L'invasine permettrait donc à ces souches de *Yersinia* de traverser les couches de cellules de leur hôte pour atteindre des tissus plus profonds. À l'Université Tufts, Ralph Isberg a montré que l'invasine est bien responsable du déclenchement de ce comportement d'admission : normalement, les cellules de la bactérie *Escherichia coli* ne sont pas invasives, mais lorsqu'on leur donne la capacité de produire l'inva-

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 - 65 F
Code 1897

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 98

sine de *Yersinia*, elles peuvent pénétrer dans des cellules de mammifères.

Les signaux chimiques synthétisés par les bactéries font partie d'un groupe de substances nommées métabolites secondaires. À l'inverse des métabolites primaires tels les acides aminés et les vitamines, les métabolites secondaires ne sont pas indispensables à la survie et à la croissance des cellules bactériennes. Dans ce cas, pour quelles raisons les bactéries synthétisent-elles une telle variété de ces composés?

Des signaux intéressants

Parmi ces métabolites secondaires, beaucoup sont des armes que les bactéries utilisent contre les micro-organismes avec lesquels elles sont en compétition : voici pourquoi certains d'entre eux sont des antibiotiques. Cependant, certains de ces métabolites secondaires sont normalement synthétisés à des concentrations bien trop faibles pour protéger efficacement ces bactéries, et nous pensons qu'ils sont souvent utilisés à des fins de communication. Les besoins de communication expliqueraient pourquoi les bactéries ont continué à fabriquer, à travers les âges, toute une gamme de composés sans nécessité apparente.

Un sous-ensemble de ces métabolites secondaires pourrait jouer un double rôle, en agissant de manière défensive à forte concentration et comme messenger aux faibles concentrations. À l'Institut Pasteur, Julian Davies et Charles Thompson ont ainsi découvert qu'à des doses trop faibles pour inhiber la croissance de bactéries cibles, certains antibiotiques libé-



5. LA STRUCTURE DE CE CORPS FRUCTIFÈRE de la myxobactérie *Chondromyces crocatus* est plus complexe que celle de *Myxococcus xanthus*. *Chondromyces crocatus* commence sa différenciation comme *Myxococcus xanthus*, mais, au lieu de former des spores dans un monticule, elle produit une tige dont les branches portent une vingtaine de petits groupes de spores, à leur extrémité. Une telle structure résulte de communications complexes entre les cellules bactériennes.

rés par des cellules bactériennes stimulaient l'expression des gènes d'autres cellules bactériennes du même type. D'autres métabolites secondaires qui n'ont pas d'effet antibiotique connu seraient en fait des molécules messagers plutôt que des agents de guerre biochimique.

En espionnant les conversations des bactéries, nous devrions mieux comprendre la tactique de survie de ces créatures qui figurent parmi les plus simples sur terre. Nos indiscretions pourraient bien mener à la découverte de nouvelles substances utiles au genre humain.

Richard LOSICK est directeur du Département de biologie cellulaire et moléculaire de l'Université Harvard. Dale KAISER est professeur de biologie du développement à l'Université Stanford.

H. BARBIER-BRYGOS, U. BONAS, J. GIRAUDAT et M. SCHULTZE, *Communication cellulaire et transduction de signaux chez les végétaux supérieurs*, in *Médecine Science*, n° spécial, vol. 12, pp. 137-142, 1996.

J. WILLEY, R. SANTAMARINA, J. GUIJARRO, M. GEISTLICH et R. LOSICK, *Extracellular Complementation of a Developmental Mutation Implicates a Small Sporulation Protein in Aerial Mycelium Formation by*

S. coelicolor, in *Cell*, vol. 65, n° 4, pp. 641-650, 17 mai 1991.

M.J. McFALL-NGAI et E.G. RUBY, *Symbiont Recognition and Subsequent Morphogenesis as Early Events in an Animal-Bacterial Mutualism*, in *Science*, vol. 254, pp. 1491-1494, 6 décembre 1991.

D. KAISER et R. LOSICK, *How and Why Bacteria Talk to Each Other*, in *Cell*, vol. 73, n° 5, pp. 873-885, 4 juin 1993.

J.B. BLISKA, J.E. GALÁN et S. FALKOW, *Signal Transduction in the Mammalian Cell During Bacterial Attachment and Entry*, *ibid.*, pp. 903-920.

S.R. LONG et B.J. STASKAWICZ, *Prokaryotic Plant Parasites*, *ibid.*, pp. 921-935.

Les galaxies fantômes

GREGORY BOTHUN

En dix ans, les astronomes ont découvert plus d'un millier de galaxies géantes à faible brillance de surface. Cette population modifie nos idées sur l'évolution des galaxies et la répartition de la masse dans l'Univers.

Notre vision de l'Univers évolue avec les télescopes. Dans les années 1920, l'astronome Edwin Hubble confirme que l'Univers s'étend bien au-delà de notre Galaxie. Les astronomes découvrent alors que l'Univers contient d'innombrables galaxies assez semblables à la nôtre, chacune comprenant des dizaines, voire des centaines de milliards d'étoiles. Ces galaxies sont regroupées dans des amas de quelques centaines de galaxies, lesquels peuvent être regroupés dans des superamas. Certains de ces superamas s'étendent sur des millions d'années-lumière, ce qui en fait les plus grandes structures connues de l'Univers.

Les astronomes distinguent alors trois types de galaxies : les galaxies elliptiques, les galaxies spirales et les galaxies irrégulières. Les galaxies elliptiques ont la forme d'un ballon de rugby, avec un centre plus brillant. Les galaxies spirales, telle la Voie lactée, sont plates, avec un bulbe central, duquel partent des bras spiraux peuplés d'étoiles plus jeunes et plus bleues que celles du bulbe. Enfin les galaxies irrégulières ont une masse relativement faible et n'ont pas de forme définie.

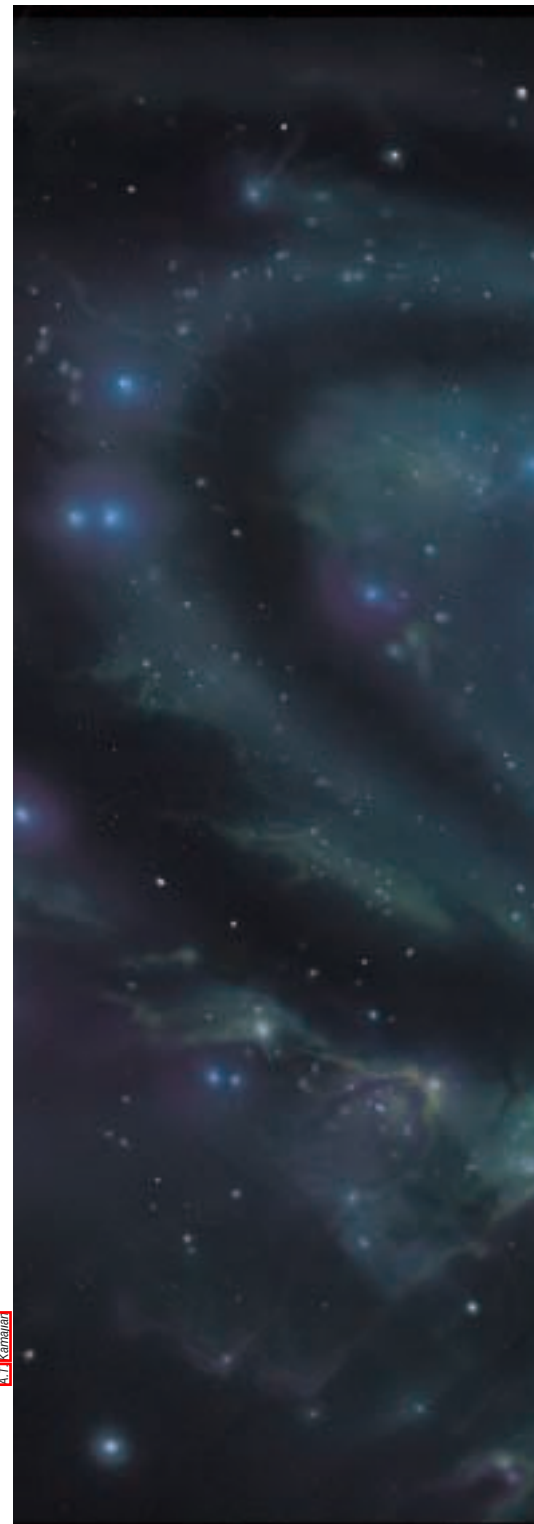
Hormis des perfectionnements mineurs, cette classification des galaxies a peu changé depuis son élaboration par Hubble, voilà 70 ans. Toutefois, des améliorations techniques ont permis de trouver de plus en plus d'objets de faible luminosité en dehors de la Galaxie. Ces dix dernières années, mes collègues et moi-même avons utilisé une méthode d'amplification du contraste photographique mise au point par l'astronome David Malin, de l'Observatoire anglo-australien. Associée à

des caméras à transfert de charges (CCD) améliorées, ces techniques nous ont permis de découvrir une nouvelle population de galaxies.

Par leur forme et par leur nombre d'étoiles, ces galaxies ressemblent aux galaxies spirales. Toutefois, elles sont beaucoup plus grandes et contiennent donc beaucoup moins d'étoiles par unité de volume. Dans une galaxie spirale ordinaire, les bras spiraux sont des pouponnières d'étoiles, peuplées de jeunes étoiles émettant une lumière plutôt bleue. En revanche, dans ces galaxies diffuses, les bras spiraux contiennent beaucoup plus de gaz et ont une structure moins enroulée. Apparemment, le gaz de ces galaxies à «faible brillance de surface» met plus longtemps à se transformer en étoiles : ces galaxies évoluent quatre à cinq fois plus lentement que les galaxies spirales classiques, et l'Univers n'est pas assez vieux pour que ces galaxies aient fini d'évoluer.

Notre travail de ces dix dernières années montre que ces galaxies seraient aussi nombreuses que l'ensemble de toutes les autres galaxies. Autrement dit, la moitié des galaxies de l'Univers avaient été oubliées.

L'abondance de ces galaxies, pour être extraordinaire, n'est cependant pas suffisante pour résoudre l'une des grandes énigmes de la cosmologie : celle de la masse manquante. Depuis longtemps, les astronomes savent que la masse de matière visible de l'Univers ne suffit pas à rendre compte du mouvement à grande échelle des galaxies dans les amas et dans les superamas. Aussi plus de 90 pour cent de la masse de l'Univers serait-elle de



1. CETTE GALAXIE A FAIBLE BRILLANCE DE SURFACE, Malin-1, est beaucoup plus grande qu'une galaxie spirale ordinaire telle la Voie lactée, que l'on a dessinée dans le coin supérieur à la même échelle.

la matière noire, c'est-à-dire non lumineuse et inobservable, sauf par ses effets gravitationnels.

Bien que les galaxies à faible brillance de surface ne soient pas assez nombreuses et massives pour constituer à elles seules la matière noire tant recherchée par les cosmologistes, elles pourraient résoudre une autre énigme, qui concerne la masse baryonique des galaxies. Les baryons sont les constituants de la matière ordinaire, principalement des protons et des neutrons. Leur fusion produit l'énergie des

étoiles et, donc, des galaxies. Cependant la quantité d'hélium de l'Univers, telle qu'on la déduit des observations spectroscopiques, indique qu'il devrait y avoir bien plus de baryons que l'on n'en voit dans les populations connues de galaxies. Les baryons manquants se trouvent-ils dans l'espace intergalactique ou dans une population de galaxies inconnues ou difficiles à détecter, telles les galaxies à faible brillance de surface? Une meilleure connaissance de ces dernières résoudrait peut-être ce problème, mais aussi changerait

nos idées sur la formation et l'évolution des galaxies.

Un astronome réhabilité

Le problème des galaxies diffuses, qui agite l'astronome moderne, n'est pourtant pas d'aujourd'hui : il est né il y a 20 ans, lorsque l'astronome Michael Disney, aujourd'hui à l'Université de Cardiff, constata que les catalogues de galaxies découvertes par les télescopes optiques ne recensaient que les galaxies faciles à détecter, c'est-à-dire



celles qui ressortaient bien sur le fond du ciel. Pourquoi ces galaxies brillantes auraient-elles été représentatives de la population générale? À cette époque, cependant, les astronomes n'avaient détecté aucune galaxie très diffuse, de sorte que la communauté astronomique balaya ces soupçons, admettant que les objets extragalactiques diffus seraient très rares.

Dix ans plus tard, nous avons ressuscité l'hypothèse de M. Disney : en 1986, mes collègues et moi-même avons découvert de manière inattendue une très grande galaxie spirale à faible brillance de surface : c'est même la galaxie spirale la plus massive (et la plus lumineuse) de toutes les galaxies spirales connues. Cette galaxie se trouve à moins de 800 millions d'années-lumière (une année-lumière, la distance parcourue par la lumière en un an, est égale à $8,7 \times 10^{15}$ mètres), ce qui est proche à l'échelle extragalactique. Si elle était aussi proche de nous que la galaxie spirale d'Andromède, située à deux millions d'années-lumière, elle sous-tendrait, dans le ciel,

un angle de 20 degrés, soit 40 fois le diamètre angulaire de la pleine lune.

Pourquoi un objet si massif et si proche a-t-il échappé aux observations pendant aussi longtemps? Nous l'avons vu précédemment, les galaxies spirales sont formées de deux éléments : un bulbe (ou noyau) central et un disque périphérique, structuré en bras spiraux. Les disques émettent généralement une lumière dont l'intensité décroît de manière exponentielle avec la distance au centre galactique.

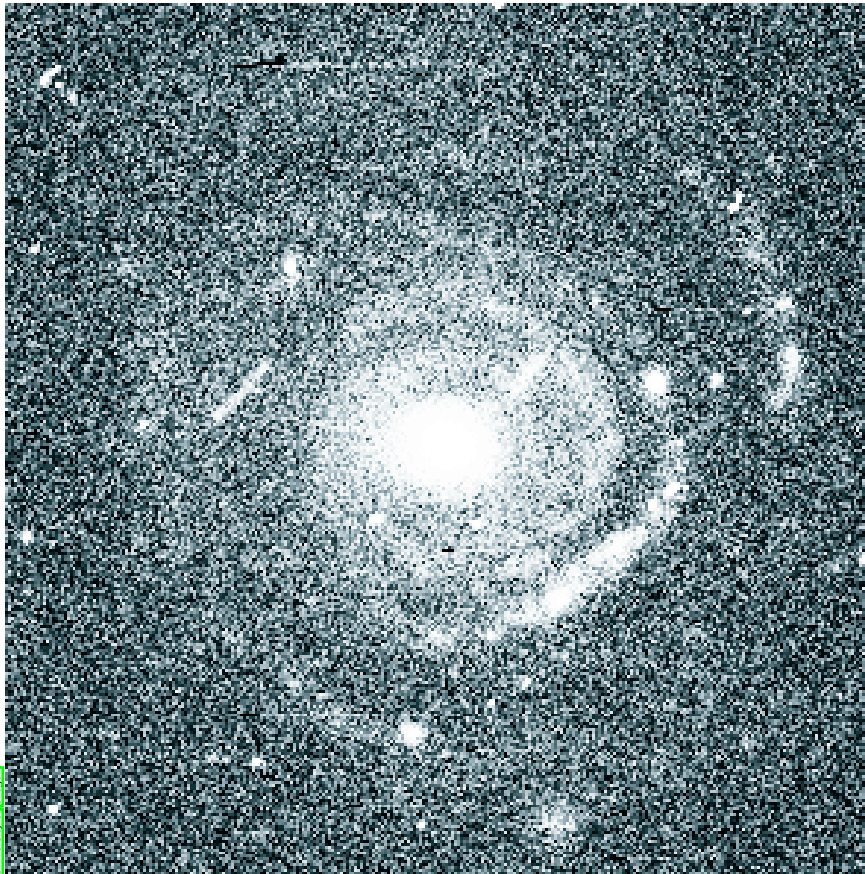
Cette particularité fournit aux astronomes un moyen commode pour mesurer la taille d'une galaxie : la longueur caractéristique d'une galaxie spirale (l'indicateur de taille utilisé par la majorité des astronomes) est la distance du centre galactique au point du disque où la luminosité a été divisée par e , (le nombre e , égal à 2,718..., est la base des logarithmes népériens). Notre Galaxie, la Voie lactée, dont le diamètre est de 100 000 années-lumière, a une longueur caractéristique d'environ 9 000 années-lumière.

L'autre paramètre qu'utilisent les astronomes pour caractériser les galaxies est la brillance de surface au centre, qui est la mesure de l'intensité de la composante bleue de la lumière au centre de la galaxie. Cette intensité révèle la densité stellaire (voir la figure 3). Le terme «de surface» renvoie au fait que les galaxies, qui sont tridimensionnelles, sont observées dans le plan du ciel ; aussi leur luminosité est-elle projetée sur cette «surface» à deux dimensions.

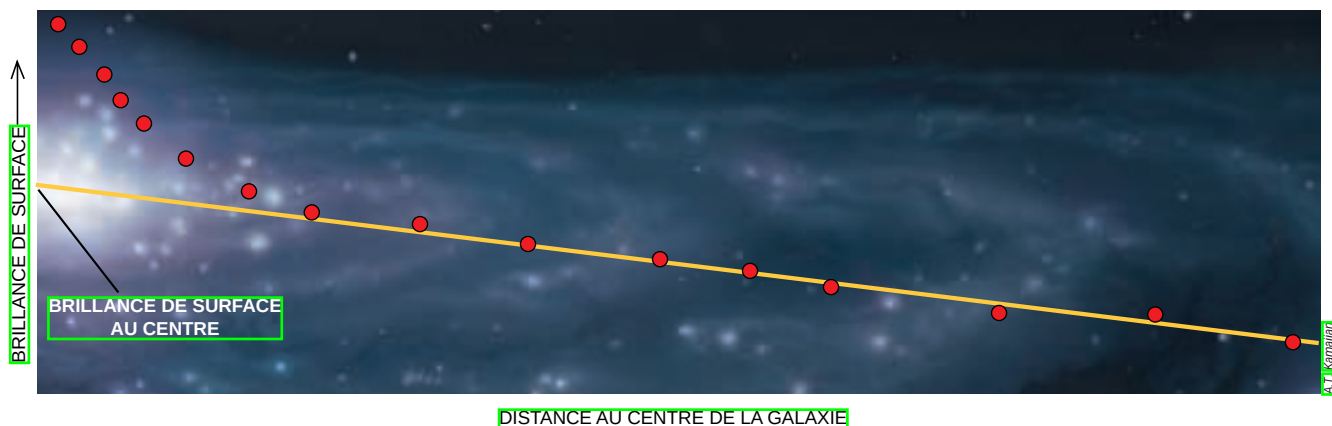
La brillance de surface au centre est exprimée en magnitudes apparentes par seconde d'angle carré. L'échelle des magnitudes attribue une valeur numérique à la luminosité d'un objet astronomique : plus cette valeur est élevée, moins l'objet est lumineux.

Cette échelle est également logarithmique : une différence de cinq magnitudes correspond à un rapport de luminosité d'un facteur 100. Une galaxie spirale typique a une brillance de surface au centre (dans la partie bleue de son spectre) d'environ 21,5 magnitudes par seconde d'angle carré. Les galaxies à faible brillance de surface sont celles dont la brillance de surface au centre est d'au moins 23 magnitudes par seconde d'angle carré : c'est environ la luminosité du fond du ciel, mesurée dans la partie bleue du spectre visible, par une nuit sans lune, dans un bon site d'observation astronomique.

Par un calcul simple, les deux paramètres précédents (la longueur caractéristique et la brillance de surface au centre) conduisent à la masse et à la luminosité d'une galaxie. Les catalogues de galaxies standards classent habituellement les galaxies selon leur taille ou leur luminosité, déduits de la longueur caractéristique et de la brillance de surface au centre. Comme les caractéristiques des galaxies à faible brillance de surface sont en cours d'étude, l'intervalle de variation des paramètres caractéristiques n'est pas encore connu. Cet intervalle de variation dépend du mécanisme de formation des galaxies, lequel reste également mal connu. La découverte des galaxies diffuses prend ici toute son importance, car elle a notablement élargi l'intervalle de variation de ces paramètres. Lorsque cet intervalle sera définitivement établi, nous pourrions ajuster les théories de formation des galaxies, car ces théories doivent être compatibles avec les valeurs observées des longueurs caractéristiques et des brillances de surface au centre.



2. LA TECHNIQUE DE D. MALIN fait ressortir les galaxies à faible brillance de surface. Cette galaxie, nommée Malin-2, a été découverte en 1990 ; c'est la deuxième galaxie diffuse découverte. Elle est à 450 millions d'années-lumière de la Terre. Avec une longueur caractéristique de 50 000 années-lumière, elle est environ cinq fois plus grande que la Voie lactée.



3. LA BRILLANCE DE SURFACE d'une galaxie spirale décroît de manière exponentielle avec la distance au centre de la galaxie. Au-delà du bulbe central, toutefois, la décroissance de la luminosité devient

quasi linéaire. Le prolongement de la région linéaire vers la gauche coupe l'axe vertical en une valeur nommée brillance de surface au centre, un indicateur de la densité d'étoiles.

Premières lueurs

C'est en 1983 que les astronomes ont pressenti que certaines galaxies ont une brillance de surface au centre nettement inférieure à celle des galaxies classiques les moins lumineuses : William Romanishin, de l'Université d'Oklahoma, Stephen et Karen Strom, aujourd'hui à l'Université d'Amherst, examinèrent le *Catalogue général des galaxies d'Uppsala*. Dans l'échantillon compilé par ces astronomes, peu de galaxies avaient une brillance de surface au centre supérieure à 23 magnitudes, mais l'analyse révéla une classe de galaxies contenant de grandes quantités de gaz et ayant d'autres propriétés inhabituelles.

Au vu de leurs résultats, je soupçonnai que la vision classique sur la répartition des galaxies dans l'Univers était biaisée. Cette répartition est une carte tridimensionnelle de l'Univers connu, indiquant la position des galaxies les unes par rapport aux autres, ainsi que leur type. Les positions relatives sont déduites de la mesure du décalage vers le rouge de la luminosité optique des galaxies (le décalage vers le rouge d'une émission est la diminution de la fréquence de cette émission due à l'effet Doppler, qu'on observe pour des corps s'éloignant rapidement les uns des autres). Les galaxies à faible brillance de surface sont toutefois trop faibles pour que l'on mesure leur décalage vers le rouge par spectroscopie optique.

Puis, au début de l'année 1984, l'astronome Allan Sandage, de l'Institut Carnegie à Washington, publia les premiers résultats de sa cartographie photographique des galaxies dans l'amas de la Vierge, effectuée à l'observatoire

de Las Campanas, au Chili : quelques galaxies naines étaient diffuses.

Avec des collègues, nous entreprîmes alors de rechercher les galaxies à faible brillance de surface qui, pensions-nous, avaient échappé à A. Sandage. Comment trouver des galaxies si faibles qu'elles avaient échappé à tant d'astronomes ? Nous devions manifestement nous armer de patience et, surtout, utiliser une technique exceptionnelle. Les journaux scientifiques nous avaient appris que D. Malin avait mis au point une méthode d'amplification du contraste des photographies qui lui avait permis de trouver des halos et d'autres débris gravitationnels de faible brillance de surface autour des galaxies ordinaires. Cette technique pouvait-elle être utilisée pour la recherche de galaxies entières à faible brillance de surface ? D. Malin piqua notre curiosité en nous avouant que, chaque fois qu'il appliquait sa technique à une plaque photographique, il trouvait partout des «petits machins à peine visibles».

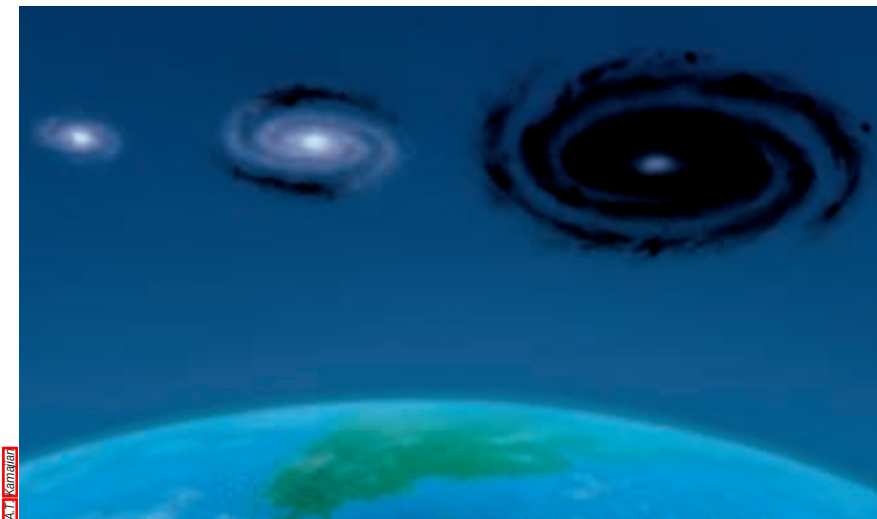
D. Malin augmente le contraste des images photographiques en empilant plusieurs plaques de verre d'une même image, puis en éclairant la pile par une face. L'image de la source lumineuse, apparaissant sur l'autre face de la pile, a un contraste supérieur à celui d'une image isolée. Plus on empile d'images, plus le contraste résultant est élevé. La technique (de «malinisation») nécessite un alignement précis des images ; c'est dans cet alignement que D. Malin avait fait de grands progrès.

D. Malin accepta d'analyser des images de quelques régions sélectionnées de un degré carré, dans l'amas de la Vierge. Utilisant à la fois le *Catalogue général d'Uppsala*, le relevé de

A. Sandage et le traitement des données par D. Malin, nous avions établi une liste d'objets à faible brillance de surface dont nous voulions approfondir l'analyse. Notre entreprise suivait son cours, lorsque nous fîmes le genre de découverte qui transforme un projet scientifique normal en une aventure exceptionnelle.

En février 1986, nous entrâmes dans la seconde phase du projet, qui nécessitait l'utilisation du télescope de 2,54 mètres de Las Campanas pour prendre des images numériques des régions de l'amas de la Vierge, étudiées par D. Malin. Notamment, nous voulions photographier des objets que nous avions identifiés lors de la première phase et pour lesquels nous voulions approfondir l'analyse. La plupart de ces galaxies étaient des taches diffuses, avec peu de structure apparente, mais l'une d'entre elles semblait avoir comme une structure en spirale très peu visible, reliée à une région centrale ponctuelle. Sur une photographie précédente, cette région apparaissait comme une étoile faiblement lumineuse, sans nébuleuse associée.

Bien que très faible, le centre de cet objet était juste assez lumineux pour que nous l'analysions par spectroscopie optique. En mai 1986, Jeremy Mould et moi enregistrâmes le spectre de l'objet à l'aide du télescope de cinq mètres de diamètre à l'Observatoire du mont Palomar, en Californie : nous fûmes surpris de découvrir que le spectre de l'objet présentait des raies d'émission (des pics d'énergie lumineuse) à des longueurs d'onde caractéristiques. Seuls des phénomènes bien connus au sein des galaxies, tels la formation d'étoiles et d'autres mécanismes où le gaz est ionisé, produisent des raies d'émission,



4. CES TROIS GALAXIES SPIRALES montrent pourquoi les galaxies à faible brillance de surface sont si longtemps restées invisibles. Toutes les galaxies ordinaires (à gauche) sont plus lumineuses que le fond du ciel nocturne. Dans la galaxie du milieu, le bulbe central et une partie des bras spiraux sont plus brillants que le fond du ciel. Toutefois, presque toutes les galaxies à faible brillance de surface (à droite) sont aussi sombres que le ciel nocturne. Des astronomes utilisant des techniques optiques ne peuvent voir cette galaxie ; au mieux, ils confondraient son bulbe à peine visible avec une étoile faiblement lumineuse.

et nous n'avions jamais rencontré aucun de ces phénomènes dans les galaxies observées au mont Palomar.

Des calculs rapides, fondés sur l'analyse des décalages vers le rouge de ces raies d'émission, indiquèrent que cet objet était 25 fois plus éloigné que l'amas de la Vierge. Or sa largeur angulaire sur notre mosaïque de caméra était d'environ 2,5 minutes : si l'objet était une galaxie et s'il était bien 25 fois plus éloigné que l'amas de la Vierge, il devait avoir environ 20 fois la taille de la Voie lactée (pour des dimensions mesurées par les longueurs caractéristiques)! Ce résultat semblait si improbable que je pariais avec J. Mould une caisse de bière que nous étions en train de détecter le spectre d'une galaxie située loin derrière l'amas de la Vierge et qui apparaissait à travers une galaxie naine beaucoup plus proche, située au sein de l'amas.

Déterminé à gagner mon pari, je me rendis, en octobre 1986, à l'Observatoire radioastronomique d'Arecibo : je voulais régler la fréquence centrale d'observation sur le décalage vers le rouge moyen de l'amas de la Vierge. Les galaxies contiennent beaucoup de gaz, tel l'hydrogène, qui émettent des ondes radiométriques décalées vers le rouge de la même façon que la lumière. Si mon hypothèse d'une galaxie naine, à l'avant-plan, dans l'amas de la Vierge, était juste, alors, en réglant les appareils sur la fréquence

des émissions gazeuses décalées provenant de la Vierge, j'aurais détecté des signaux de l'hypothétique galaxie naine. Toutefois je ne trouvais aucun signal de ce type.

Je me retrouvais brièvement dans l'impasse avant d'avoir la meilleure idée de ma carrière. À l'Observatoire du mont Palomar, les signaux que nous avions reçus en provenance de cette galaxie située dans la direction de l'amas de la Vierge étaient décalés de 8,3 pour cent vers le rouge. Bien qu'Arecibo soit un radiotélescope et non un télescope optique, ce décalage devait s'appliquer à toute émission issue de l'objet, quelle que soit sa fréquence. Aussi, deux jours avant que ma campagne à Arecibo ne s'achève, je réglai la fréquence d'observation sur 21,1 centimètres, c'est-à-dire la longueur d'onde des émissions radio de l'hydrogène atomique, décalée vers le rouge de 8,3 pour cent. Dix minutes plus tard, j'étais récompensé par un superbe signal.

La plus grande galaxie connue

L'hydrogène atomique, qui représente environ dix pour cent de la masse de nombreuses galaxies, se concentre dans les bras des galaxies spirales. Aussi utilise-t-on souvent ses émissions pour déterminer si un objet très lointain est, ou non, une galaxie. La signature du signal à 21,1 centimètres reçu à Arecibo était exactement celle d'un disque

galactique en rotation. Je perdais ainsi mon pari en découvrant Malin-1, une galaxie spirale immense, extraordinairement diffuse. Malin-1 possède une brillance de surface au centre de 26,5 magnitudes par seconde d'angle carré, soit seulement un pour cent de la luminosité d'une galaxie ordinaire.

Nous commençâmes alors trois nouvelles études, afin de savoir si l'Univers renfermait d'autres galaxies du même type. Tout d'abord, nous analysâmes des plaques photographiques résultant du projet de cartographie étendue de l'Observatoire du mont Palomar.

Puis nous appliquâmes la technique de malinisation à l'amas du Fourneau : nous avons alors détecté des galaxies dont l'intensité lumineuse de surface au centre descendait à 27 magnitudes par seconde d'angle carré, soit à peine deux pour cent plus brillantes que le fond du ciel nocturne. Enfin, avec Michael Irwin, de l'Observatoire royal de Greenwich, nous avons appliqué des techniques de balayage automatique des plaques photographiques.

Au total, nous avons ainsi détecté un millier d'objets que nous pensons être des galaxies à faible brillance de surface. L'échantillon est assez varié, avec à la fois des galaxies naines, pauvres en gaz, et environ une dizaine d'objets très grands et riches en gaz comme Malin-1 (dix ans après sa découverte, Malin-1 demeure la plus grande galaxie connue). La plupart de ces galaxies ont les mêmes tailles, vitesses de rotation et masses que les galaxies spirales ordinaires, mais quelques-unes sont gigantesques, avec des longueurs caractéristiques supérieures à 50 000 années-lumière.

Dans les amas de galaxies et, peut-être, dans l'Univers en général, les galaxies à faible brillance de surface semblent être bien plus nombreuses que les galaxies ordinaires. En outre, si le quotient de la masse par la luminosité augmente lorsque la brillance de surface diminue (c'est-à-dire que moins les galaxies sont visibles, plus elles sont massives), alors ces galaxies diffuses abritent une grande partie, voire l'essentiel de la masse baryonique de l'Univers.

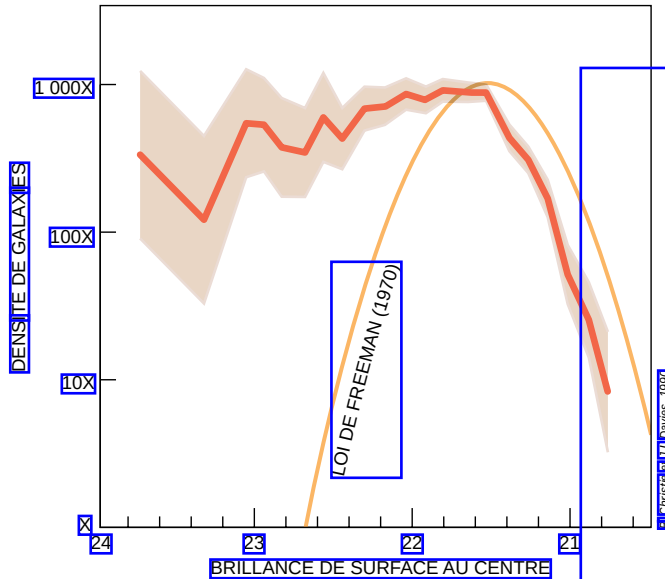
La conséquence la plus marquante de ces recherches provient d'une analyse récente effectuée par Stacy McGaugh, de l'Institut Carnegie, à Washington. S. McGaugh a examiné la densité spatiale des galaxies en fonc-

tion de leur brillance de surface au centre, et elle a observé que la courbe tracée différait complètement de la courbe prévue (voir la figure 5) : au total, l'Univers semble contenir autant de galaxies très diffuses ayant une brillance de surface au centre de 27 magnitudes par seconde d'angle carré que de galaxies ordinaires de 23, 21 ou 20 magnitudes. Autrement dit, plus de la moitié de toutes les galaxies sont des galaxies spirales de brillance de surface au centre égale ou supérieure à 22 magnitudes par seconde d'angle carré.

De surcroît, les galaxies à faible brillance de surface ressemblent beaucoup aux galaxies bleues faiblement lumineuses détectées dans les cartographies de l'Univers lointain. Ces deux classes de galaxies partagent des attributs comme la couleur, la brillance de surface moyenne et l'étendue de la nébulosité. Ainsi, ces galaxies bleues faiblement lumineuses pourraient être des galaxies à faible brillance de surface en phase initiale de formation d'étoiles. Aux courtes distances, c'est-à-dire dans les parties de l'Univers où les objets sont vus tels qu'ils étaient dans un passé plus récent, les galaxies bleues ont une brillance de surface si faible que l'on ne peut plus les détecter. Si les galaxies bleues faiblement lumineuses sont vraiment des galaxies à faible brillance de surface jeunes, alors la densité des galaxies à faible brillance de surface doit être encore supérieure à ce que l'on pense aujourd'hui.

Des études sur la couleur des galaxies à faible brillance de surface, qui sont généralement assez bleues, corroborent cette hypothèse, dont on a besoin pour interpréter la composante bleue de ces galaxies, signe de formation d'étoiles. Généralement la teinte bleue indique une galaxie qui n'a pas évolué au-delà d'une phase de formation précoce, un fait en accord avec les faibles densités de ces structures ; aussi la plupart des galaxies à faible brillance de surface se seraient-elles formées assez tardivement, tout comme leurs premières étoiles.

Plusieurs autres particularités des galaxies diffuses doivent nous faire révi-



5. LES GALAXIES DIFFUSES (23 ou 24 magnitudes apparentes par seconde d'angle carré) sont probablement aussi nombreuses que les galaxies ordinaires, pour lesquelles cette magnitude est de 21,5 ou 22. Sur ce diagramme, la zone grisée indique le domaine d'incertitude des données numériques. La courbe orange montre la distribution supposée des galaxies avant la découverte des galaxies à faible brillance de surface, au milieu des années 1980.

ser les théories de l'évolution des galaxies. Par exemple, la quantité d'hydrogène neutre dans les galaxies à faible brillance de surface est du même ordre de grandeur que dans les galaxies spirales ordinaires, encore que les galaxies à faible brillance de surface aient des densités inférieures de ce gaz. Autrement dit, les étoiles ne se formeraient que si la densité gazeuse atteignait une valeur seuil à la surface des disques de gaz en rotation. En outre, les galaxies spirales à faible brillance de surface sont pauvres en gaz moléculaire.

L'ensemble de toutes ces observations indique que la densité d'hydrogène neutre à la surface des galaxies diffuses est insuffisante pour transformer ce gaz en nuages moléculaires géants qui, dans les galaxies ordinaires, se fragmentent ensuite pour former des étoiles massives. Les galaxies spirales à faible brillance de surface semblent évoluer de façon différente, avec de petites étoiles qui ne se formeraient qu'au sein de nuages d'hydrogène neutre de plus faible densité. Contenant peu d'étoiles massives, ces galaxies synthétiseraient lentement les éléments lourds (au numéro atomique supérieur à 12). Ordinairement, les galaxies massives contiennent beaucoup d'éléments lourds ; si, malgré leur masse, les galaxies à faible brillance de surface sont si pauvres en éléments lourds, c'est qu'elles sont parmi les objets les moins évolués de l'Univers : elles ont peu

changé depuis des milliards d'années.

En une décennie, l'exploration de cette nouvelle population de galaxies a bouleversé nos connaissances de l'évolution des galaxies et de la répartition de la matière dans l'Univers. Au cours des prochaines années, nous rechercherons ces galaxies de manière plus systématique, par des cartographies de larges régions du ciel là où il est le plus sombre. Lors de ces prochaines campagnes, nous utiliserons des techniques qui détecteront des galaxies dont la brillance de surface au centre atteint 27 magnitudes par seconde d'angle carré. Les données révéleront si la densité des galaxies dans l'espace, en fonction de leur brillance de surface au centre, continue de rester plate lorsque cette intensité varie d'un facteur 100.

L'étendue finale des découvertes potentielles et de leurs implications pour notre compréhension de l'évolution galactique et de la structure de l'Univers est encore... diffuse. Toutefois, il est réconfortant de constater que de grandes découvertes astronomiques sont encore possibles : l'Univers n'a pas dévoilé tous ses secrets.

Gregory BOTHUN est professeur de physique à l'Université de l'Oregon.

Stacy S. McGAUGH et Gregory D. BOTHUN, *Structural Characteristics and Stellar Composition of Low Surface Brightness Disk Galaxies*, in *Astronomical Journal*, vol. 107, n° 2, pp. 530-542, février 1994.

Stacy McGAUGH, Gregory D. BOTHUN et James M. SCHOMBERT, *The Morphology of Low Surface Brightness Disk Galaxies*, in *Astronomical Journal*, vol. 109, n° 5, pp. 2019-2033, mai 1995.

Stacy McGAUGH et al., *Galaxy Selection and the Surface Brightness Distribution*, in *Astronomical Journal*, vol. 110, n° 2, pp. 573-580, août 1995.

Chris IMPEY, *Ghost Galaxies of the Cosmos*, in *Astronomy*, vol. 24, n° 6, pp. 40-45, juin 1996.

Des informations et des images sur ce sujet peuvent être trouvées sur notre site Web :

<http://www.pourla science.com>

L'introduction de l'alphabet latin au Japon

FLORIAN COULMAS

Les Japonais s'étonnèrent de l'écriture alphabétique des premiers Européens admis dans leur pays, au XVII^e siècle. Aujourd'hui encore, l'alphabet européen leur semble une modernité exotique.

On ignore quand exactement les Japonais apprirent pour la première fois l'existence d'une écriture alphabétique. Leurs relations commerciales avec la Chine ou la Corée, dès le I^{er} siècle avant J.-C., ou avec l'Indonésie et la Malaisie, vers le XIV^e siècle, leur ont certainement révélé assez tôt l'existence de l'alphabet latin des pays d'Europe, mais les premiers ouvrages d'écriture alphabétique ne semblent être entrés au Japon qu'au XVI^e siècle.

L'adaptation du système d'écriture chinois à la langue japonaise avait alors engendré un système complexe, avec deux ensembles de caractères, nommés kanji et kana. Les kanji sont les caractères chinois, qui correspondent chacun à un mot monosyllabique chinois. Les caractères kana, qui résultent de diverses simplifications des caractères kanji, ne possèdent pas de signification propre, mais représentent chacun un son monosyllabique. Il en existe deux variantes usuelles, nommées hiragana et katakana.

Les caractères kanji sont utilisés aujourd'hui comme ils l'étaient au XVI^e siècle, pour désigner la signification des mots, tandis que les signes hiragana sont employés pour représenter les éléments grammaticaux (désinences, conjugaisons...). Les caractères katakana servent, enfin, à transcrire les termes étrangers. Tandis que la prononciation d'un caractère kanji n'est pas toujours univoque, les caractères kana sont simples et précis, ce qui justifie parfois leur utilisation pour faciliter la lecture.

Au XVI^e siècle, les missionnaires jésuites qui arrivèrent au Japon, en pro-

venance des Indes néerlandaises et de Macao, apportèrent avec eux des livres écrits avec des caractères alphabétiques ; ils furent rapidement suivis par des commerçants (voir la figure 1). Ils furent les premiers à écrire, pour leur propre usage, le japonais avec des caractères de l'alphabet européen. L'un d'entre eux, Francisco Javier (1506-1552) apprit correctement le japonais et l'écrivit selon les règles orthographiques du portugais de l'époque.

Puis, en 1592, un autre jésuite, Alessandro Valignano (1539-1606), fut le premier à rédiger un livre japonais en caractères latins : il s'agissait d'une hagiographie intitulée *Sanctos no gosagveo no vchi nvqigaqi*, c'est-à-dire «Extraits des livres des saints» (le titre s'écrirait de nos jours *Sanctos no gosagyo no uchi nukigaki*). Cet ouvrage montre comment les Portugais appliquaient les conventions d'écriture de leur langue à d'autres langues, ce qui provoquait diverses incohérences ; il fut aussi la première occasion de constater que l'alphabet latin ne s'appliquait pas simplement à la langue japonaise.

Les jésuites ne savaient pas regrouper les syllabes en mots. Ils écrivaient tantôt *to xite xixi tamayeba*, tantôt *toxite xixitamayeba* (voir la figure 2, à gauche) : en effet, les textes japonais étaient écrits sans séparation entre les mots (ils le sont encore aujourd'hui). Pour effectuer la segmentation, les jésuites se fondèrent sur des fonctions spécifiques des systèmes kanji et kana, bien que ces fonctions ne soient pas toujours invariables dans les divers styles d'écriture.

Valignano, qui pensait que son travail était d'une immense importance culturelle, croyait que les Japonais l'accueilleraient avec enthousiasme, mais il fut amèrement déçu : pour mieux lire ses textes, les Japonais les convertirent dans leur écriture (voir la figure 2, à droite).

En effet, l'écriture proposée par les Portugais était illogique, car, souvent, elle utilisait plusieurs signes pour traduire un seul mot japonais, plusieurs lettres pour écrire une seule syllabe (voir la figure 3). En outre, les mêmes syllabes n'étaient pas toujours écrites avec les mêmes lettres : les lettres *e* et *ye*, par exemple, représentaient le même signe. De surcroît, les syllabes commençant par certains sons qui appartiennent à des séries, en japonais (tel [k]), étaient transcrites alphabétiquement par des syllabes qui ne commençaient pas toutes par la même lettre (par exemple, *ca*, *qe*, *qi*, *co*, *cu* et *qu*).

L'instabilité de l'alphabet

Ainsi les Portugais écrivaient *atayeta-maite* le mot «prêter», que l'on transcrit aujourd'hui *ataetamaite*. La lettre *y* indique une palatalisation douce : une réminiscence d'un *y* pour favoriser le passage du *a* au *e*, sans pour autant constituer un phonème. De tels exemples indiquent que les Portugais ne comprenaient pas bien le principe de leur propre écriture et ne savaient pas analyser phonétiquement le japonais, une condition qui semble aujourd'hui indispensable à la transcription alphabétique des langues.

Après les Portugais, des Italiens, des Français et des Allemands se rendirent au Japon (voir l'encadré de la page 92) ; tous transcrivaient le japonais conformément aux règles de leur propre langue (voir la figure 4). Comment les Japonais auraient-ils pu s'intéresser alors à une écriture de leur langue à l'aide de l'alphabet latin? Les signes utilisés étaient peu nombreux, certes, mais les diverses façons d'écrire les mots japonais faisaient perdre le sentiment d'économie de l'écriture alphabétique.

Si les Japonais avaient entrepris une analyse des langues européennes,

ils auraient compris les règles d'emploi des lettres *x* et *s*, de *k*, *c* et *q*, de *ch*, *sh* et *ç*. Toutefois, n'auraient-ils pas également conclu que les signes alphabétiques étaient instables et que leur valeur dépendait de la langue utilisée?

L'arrivée des Hollandais

Curieux des cultures étrangères, les Japonais comprirent néanmoins que l'écriture latine pouvait leur permettre d'apprendre les langues qui, de toute façon, ne disposaient pas d'une

meilleure écriture. Puisque chacune de ces langues avait sa transcription particulière, il fallait choisir par l'une d'entre elles ; laquelle? Le problème se résolut pragmatiquement : au début du XVII^e siècle, les autorités japonaises décidèrent de fermer les frontières aux Européens, fauteurs de troubles dans d'autres régions asiatiques, et limitèrent leurs autorisations d'accès aux commerçants hollandais (voir la figure 5). Cet isolement se prolongea jusqu'à ce que l'armée Nord-américaine fasse pression sur le Japon, en 1854.



1. L'ARRIVÉE DES MARCHANDS PORTUGAIS au Japon est représentée sur ce paravent de l'école de Kano. Des jésuites et des commerçants déjà établis dans le pays accueillent la procession pompeuse d'un équipage qui apporte animaux et cadeaux. Le peintre était manifeste-

ment intéressé par les vêtements et les esclaves des Portugais, qui lui semblaient exotiques. Cet intérêt se lit dans le regard des Japonais qui contemplent la scène à travers les fenêtres des magasins. Des rites chrétiens sont représentés dans la partie supérieure de l'image.

Les historiens ont longuement débattu des causes de cette fermeture au monde, mais il est clair qu'elle eut l'avantage, pour les Japonais, de se concentrer sur l'apprentissage de l'alphabet latin appliqué à une seule langue, le hollandais, parlé par un peuple qui privilégiait le commerce et la comptabilité aux guerres de religion.

De nouvelles formes d'écriture apparurent alors : *tsoe* pour [tsu] (*tçu* dans le *Livre des saints*), *tsijo* pour [t o] et *su* pour [u] (ici l'écriture phonétique est donnée entre crochets). L'expérience prouva que les Hollandais avaient un emploi des lettres aussi incohérent que les autres Européens (parfois, en ne suivant même pas les règles de leur propre langue). Le mot japonais signifiant «homme», que l'on prononce [çito] ([ç] représente le *ch* palatal, [i] le *i* bref, et [o] le *o* ouvert, comme dans «donner»)

fut écrit de trois façons différentes : *fito*, *hito* et *sto*.

Métaécritures

Les Japonais conclurent alors que l'écriture alphabétique d'un texte ne déterminait pas sa prononciation de manière univoque ou, du moins, que cette détermination nécessitait des compléments, comme dans leur propre langue. Ils jugèrent qu'ils devraient résoudre le problème de l'écriture alphabétique par l'emploi d'une métaécriture, c'est-à-dire un système de signes permettant de compléter ou de commenter une autre écriture, dite écriture objet. Ainsi nous avons vu que le kana est la métaécriture du kanji, depuis le X^e siècle. De même, le kana servit (il sert encore) de métaécriture des mots étrangers.

Lorsque l'on utilise une métaécriture, on effectue une conversion vers

un système de références conformément à un système descriptif. Une illustration claire de cette application est donnée dans l'ouvrage intitulé *Oranda moji ryakko* (soit «Observations sur les signes néerlandais» : le mot *oranda* dérive du mot «hollandais»), écrit en 1746 par Aoki Konyo (1698-1769). Ce dernier était un lettré qui se consacra à l'étude du néerlandais (conformément à l'usage japonais, le nom Aoki, s'écrit devant le prénom, Konyo). Son étude systématique de l'alphabet néerlandais est une des premières de celles qui furent réalisées par les Japonais. Aoki nomma les lettres latines *oranda moji*, «signes hollandais», nom qu'elles conserveront pendant plus d'un siècle. Son ouvrage commençait par un inventaire. Il observait que les lettres ont trois aspects différents, nommés *trekletter*, *merkletter* et *drukletter* (minuscules, majuscules et caractères gothiques).

Le poème I-ro-ha

Le marchand florentin Francesco Carletti, qui arriva au Japon en 1597, laissa une description des «hiéroglyphes» et des «trois ou quatre types d'alphabets» utilisés par les Japonais. Sa chronique de voyage intitulée *Ragionamenti del mio viaggio intorno al mondo* («Chronique de mon voyage autour du monde») énumère les signes kana sous la forme traditionnelle d'un poème. Carletti élaborait également une liste de signes, qu'il perdit et dont il ne conserva qu'une transcription (à droite). Le poème *I-ro-ha*, daterait du IX^e siècle et se fonderait sur un passage du *Sutra du Nirvana*, un texte sacré du bouddhisme. Il est intéressant de constater que les débuts de l'écriture phonétique apparurent au Japon en même temps que le bouddhisme. L'ordre de classification du kana dans des dictionnaires et dans d'autres œuvres met en lumière ses origines tirées de l'alphabet indien. Le poème *I-ro-ha* comporte les syllabes suivantes (en transcription actuelle):

i ro ha ni ho he to
chi ri nu ru wo
wa ka yo ta re so
tsu ne na ra mu
u wi no o ku ya ma
ke fu ko e te
a sa ki yu me mi shi
we hi mo se su

Regroupement
en mots :

iro wa nioedo
chirinuru wo
waga yo tare zo
tsune naramu
ui no okuyama
kyo koete
asaki yume miji
ei mo sezu

Traduction :

Les fleurs multicolores resplendissantes se sont fanées.
Est-il rien d'éternel
En ce monde ?
Dépassées déjà les limites du monde éphémère
Je ne me livrerai plus à aucun songe frivole
Ni à l'ivresse.

Carletti, qui ne dominait pas le japonais, nota le poème en transcrivant les sons japonais à l'aide de l'orthographe italienne. Il ne put séparer les syllabes ni les regrouper en mots ; sa transcription est intermédiaire entre les deux solutions. En plusieurs occasions, son oreille l'a gravement trompé (surtout dans le dernier vers).

RAGIONAMENTO PRIMO 83
Gio. Za. Ma. Mu. Ta. Ri. Lo.
chi. che. U. Re. nu. fa.
Iu. fu. y. Zo. Ru. Ni.
Me. Co. No. Zu. O. Fo.
Mi. E. Vo. Ne. Ica. Fe.
Sec. Ze. Cu. Na. Ca. Fo.
Le due ultime fillabe vogliono dire il fine ; e di più hanno ancora li caratteri de' numeri , le fillabe, de' quali da uno infino a dieci sono li seguenti. 1 Iu. 2 Ni. 3 Ta. 4 Sci. 5 Go. 6 Loca. 7 Sicci. 8 Facci 9 Cu. 10 Giu. Ma quanto all' Alfabeto si legge nelle scuole de' Fanciulli , quando imparano , in tuono di verfo cantando , in questo modo pronunziato
Ilò , fa , ni , fo , fe , to . primo verfo
Ciui , nu , ru , o , vaca . secondo verfo
Io . ta . re , zo . zu , ne , na . terzo verfo
Ra . ma . u . yno uo , cu . quarto verfo
la . ma . che . fu , Coete . quinto verfo
Ara chiù , me . mi sci . ultimo verfo.
E tutte queste soprafcritte fillabe si compongono con diciasette delle nostre

Aoki étudia le problème des groupes de lettres qui forment un tout, pour lesquels se pose clairement le problème de la représentation de la langue néerlandaise par sa propre écriture : les règles de prononciation des syllabes ne peuvent se transposer mécaniquement aux mots, puisqu'il existe des incohérences entre la liste des syllabes et celle des mots. Par exemple, Aoki divise le mot *schaep* (en néerlandais moderne *schaap*), «mouton» comme *s-cha-e-p*, ce qui, transcrit en métaécriture, devient *shi-ka-pu*. En revanche, il transcrit *su-ka-a* le groupe de lettres néerlandais *scha*, sans pouvoir expliquer pourquoi *scha* devant *-e* ne constitue pas une unité. Sa description de la prononciation du mot *schaep* n'est pas complètement erronée, car la séparation du *s* et l'union de *cha* et de *e* dans une syllabe écrite correspond bien à la prononciation du néerlandais de l'époque. Néanmoins, il ne résout pas le problème de la correspondance entre les lettres et les phonèmes, ou éléments sonores du langage.

Comme Aoki, il élaborait une table syllabique.

Toutefois, il dépassa son prédécesseur en montrant comment écrire des textes japonais simples avec des caractères néerlandais. Il prit pour exemple la chanson de Yamato qui s'utilisait très souvent, à l'époque, pour l'apprentissage du kana. Comme pour l'écriture kana, Maeno regroupa les caractères alphabétiques en syllabes et non en mots.

Il était convaincu que la compréhension impose une analyse ; avec Sugita Gempaku et d'autres philologues, il fut l'un des premiers Japonais à assister à une autopsie. Pour ces études, les médecins hollandais utilisaient les *Ontleedkundige Tafelen*, une traduction des *Anatomischen Tafeln* (« Tables d'anatomie ») de l'Allemand Johann Adam Kulmus (1689-1745). Maeno et ses collègues furent si impressionnés par la précision des descriptions qu'ils traduisirent cette œuvre en japonais.

Ainsi l'accès des Japonais à la science occidentale s'effectua principalement au travers de la médecine.

L'art de l'autopsie devint un modèle d'activité scientifique, et la communauté hollandaise de Nagasaki devint la principale source d'informations. *Rangaku*, « savoir hollandais », fut le terme par lequel les Japonais désignèrent la science jusqu'à la fin de la politique d'isolement, le néerlandais étant la langue de la science, qui concurrença ainsi le chinois classique, langue traditionnelle du savoir. Celui qui souhaitait découvrir la science moderne devait apprendre le néerlandais et maîtriser l'écriture latine.

Maeno donna un autre exemple de transcription, avec le poème *I-ro-ha* (voir la figure 7, à droite) ; il établit ainsi les bases du système utilisé au Japon... jusqu'à ce que le néerlandais perde sa suprématie, dès l'ouverture du Japon au monde occidental.

Les caractères romains

Lorsque les canonnières américaines mirent un terme à 250 années d'isolement et que le Japon nous subite-

ment des relations avec les Américains et les Européens de divers pays, au milieu du XIX^e siècle, les Japonais comprirent que le néerlandais était une langue mineure ; les signes écrits utilisés par les Hollandais n'étaient pas leur apanage, mais appartenaient à la culture de tous les pays occidentaux. Apprenant que ces signes dataient de la civilisation romaine, les Japonais voulurent leur rendre leur nom correct : ils abandonnèrent le nom *oranda moji* pour *romaji*, « signes romains ».

Ce fut alors une renaissance intellectuelle pour le pays. Afin de découvrir le savoir occidental, les Japonais traduisirent les livres occidentaux de tous les domaines scientifiques et techniques. La littérature chinoise, qui avait semblé contenir l'ensemble du savoir pendant des siècles, fut jugée dépassée, et son écriture parut être un obstacle au développement.

Quelques groupes intellectuels cherchèrent alors à favoriser l'adoption de l'écriture alphabétique latine.



5. ENTRE 1640 ET 1854, le Japon s'isola du reste du monde occidental, n'ayant de relations avec lui que par la colonie commerciale hollandaise Dejima, une île artificielle de 800 mètres carrés, construite initialement pour les Portugais, en face de la ville portuaire de Nagasaki. L'image supérieure fait partie d'un paravent peint au milieu du XVII^e siècle. Le détail de droite date de 1842. Les contacts des quelques habitants de l'île avec le reste du Japon étaient strictement réglementés et contrôlés. Les membres de la Compagnie des Indes occidentales avaient le rang de représentants de leur gouvernement, mais leur appartenance à la confrérie des commerçants les plaçait socialement au-dessous des samouraïs, des agriculteurs et des artisans, selon l'idéologie confucéenne.



Ainsi, en 1869, Nanbu Yoshikazu publia un traité intitulé *Shukokugo ron* («Pour l'amélioration de la langue nationale»); il fut soutenu par plusieurs intellectuels influents, tels le philosophe Nishi Amane et le philologue Otsuki Fumihiko.

Au début de l'ère Meiji (1868-1911), intellectuels et autorités envisagèrent une réforme de l'écriture, avec un remplacement de l'écriture chinoise par l'écriture kana et par l'écriture latine. Certains partisans de l'écriture alphabétique fondèrent la *Romaji kai* («Société pour l'écriture latine») en 1885, et publièrent le premier numéro de leur revue *Romaji zasshi*, cette même année. Le premier chantier de ce groupe fut la systématisation de l'écriture latine : comme les lettres de l'alphabet s'adaptaient à des langues variées, pourquoi ne pas élaborer une adaptation aux exigences du japonais?

Le système vocalique du japonais est simple, ce qui facilitait l'adoption d'un modèle européen, dont le plus pur était l'italien. Les voyelles de tous les signes kana sont brèves et se prononcent en majorité comme les voyelles espagnoles brèves correspondantes. Les voyelles longues suivent les règles de la phonologie japonaise, deux morphèmes s'écrivant sous la forme de deux kana, que l'on peut transcrire comme *aa*, *ei*, *ii*, *oo* et *uu*.

Pour l'écriture des consonnes, les philologues de la *Romaji kai* s'inspirèrent plutôt de l'orthographe anglaise, représentant le son [i] par *shi*, le son [t i] par *chi* et le son [t a] par *cha*. Le missionnaire américain James Curtis Hepburn (1815-1911) utilisa ce système de la *Romaji kai* pour la troisième édition de son dictionnaire japonais-anglais de 1886, de sorte que le système fut ensuite connu sous le nom de système Hepburn.

Le géophysicien Tanakadate Aikitsu (1856-1952) avait proposé en 1881 un système différent, qui utilisait le *goju onzu* («Table des 50 sons»), une table de correspondance linguistique fondée sur les syllabes simples du système kana. Dans ce système, nommé *nipponshiki* («méthode japonaise»), [i] s'écrivait *shi*, [t i] s'écrivait *ti* et [t a], *tya*.

Les systèmes Hepburn et *nipponshiki* ont des principes opposés : le premier essaie d'optimiser la transcription conformément aux règles de l'anglais,

tandis que le second cherche une cohérence interne, fondée sur les règles de la phonétique. Malgré la dissolution de la *Romaji kai* en 1892, les deux systèmes eurent leurs partisans et furent utilisés pendant une période au cours de laquelle l'adoption des coutumes occidentales fut âprement critiquée. Les autorités, notamment, ne choisirent aucun des deux systèmes, ni aucun système intermédiaire.

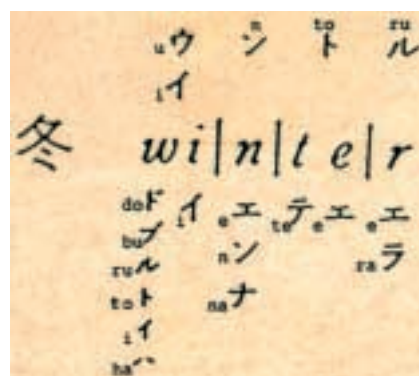
Il fallut attendre 1930 pour qu'une commission nommée par le ministère japonais de l'Éducation établisse des directives de représentation de la langue japonaise en caractères alphabétiques. La commission rendit son rapport en 1937, prônant un système plus proche du *nipponshiki* que du système Hepburn. Après un accord du gouvernement, ce système fut proposé sous le nom de *kunreishiki* (*romaji tsuzurikata*), «écriture latine officielle». Les différences entre les trois systèmes sont minimes (voir la figure 9).

La question de la substitution de l'écriture japonaise, simplifiée en 1948, ne fut alors plus abordée, bien que de nombreuses associations se soient fondées pour défendre cet objectif. Les partisans de la *yokomoji*, «les signes horizontaux», ainsi nommés en raison de la direction horizontale de l'écriture latine, ne retrouvèrent de soutien qu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale,

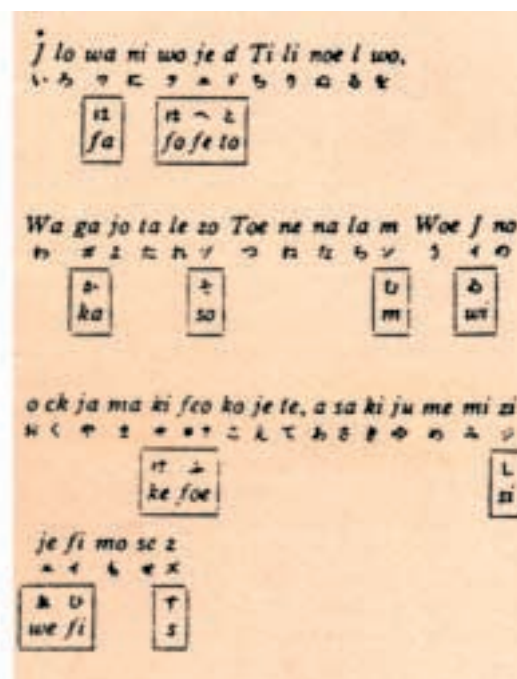
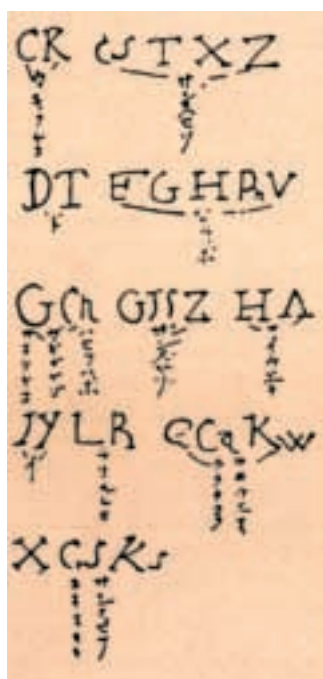
quand les Américains s'employèrent à promouvoir une réforme qu'ils jugeaient utile à la démocratisation du pays. Le conservatisme de la société japonaise fit échouer leur projet, mais l'occupation américaine fit entrer l'écriture alphabétique dans la vie quotidienne du Japon.

L'alphabet dans l'écriture actuelle

En 1954, le gouvernement japonais recommanda officiellement l'utilisation de l'écriture latine officielle pour



6. LE MOT JAPONAIS FUYU, «hiver» et son équivalent néerlandais *Winter*, avec sa prononciation (en haut) et le nom de ses lettres (en bas). L'exemple provient du texte *Oranda moji ryakko*, d'Aori Konyo, publié en 1746. La prononciation des signes kana fut intégrée ultérieurement. Le nom néerlandais de la lettre *w* est *dubbel-ve* ; *ve* est transcrit par [i-ha].



7. MAENO RYOTAKU disposa les lettres de l'alphabet latin selon les syllabes du système kana de sons proches (à gauche) dans son étude *Oranda yakubun ryaku* de 1771. À droite, on a indiqué sa transcription du poème traditionnel *I-ro-ha*.

la transcription alphabétique du japonais, mais il n'imposa pas ce système pour autant. Certains ministères, tel celui des Travaux publics, et certaines institutions, telle la Bibliothèque du Parlement, l'adoptèrent. D'autres organismes, le ministère des Affaires étrangères et le ministère des Transports, conservèrent le système Hepburn, qui resta le plus diffusé, sans doute parce qu'il était utilisé par la majorité des dictionnaires japonais-anglais et dans les livres de texte d'anglais, ainsi que dans les cartes de visite, les passeports, la presse japonaise de langue anglaise et dans l'étude du japonais à l'étranger. La présence Nord-américaine, à partir des années 1950, renforça les relations entre l'écriture alphabétique et la langue anglaise, et le *romaji* commença à être nommé *eiji*, «signe anglais».

L'utilisation «décorative» des signes alphabétiques, surtout par la publicité et le commerce, se développa alors, parce que les signes latins donnent aux Japonais une impression de modernité et d'exotisme ; tout ce qui doit paraître moderne reçoit un nom alphabétique. Par exemple, aucun nom de voiture

n'est écrit en caractères kanji. Bien que les noms des marques soient initialement écrits en signes chinois, puisqu'il s'agit de noms propres (*Honda*) ou d'abréviations de désignations sino-japonaises (*Nissan*), c'est une forme alphabétique de ces noms qui apparaît sur les produits.

De même, les revues qui souhaitent offrir une image de marque moderne ont pratiquement toutes des titres alphabétiques : *Asahi Journal*, *Auto Sports*, *Baccus*, *Be Love*, *Brutus*, *City Road*, *The Computer*, *Cycle World*, *Dime*, *Emma*, *FM*, *Focus*, *Friday*, *Flash*, *Information*, *Jazz*, *Muffin*, *Olive*, *Quark*, *TV Cosmos*, *Viva Rock*... Pour tous ceux qui ne sauraient pas lire ces noms, une métaécriture en caractères kana est proposée. Dans le cas des mots étrangers, cette métaécriture est obligatoire. Les exemples précédents, d'origine anglaise, se prononcent comme en anglais, mais d'autres revues ont un titre écrit en français ou en allemand, comme *Le Cœur*, *Arbeit*, *Beruf* ou *25 ans*.

L'alphabet latin est également utilisé dans les abréviations de mots d'origine japonaise ou étrangère : KKD

(*Kokusai Denshin Denwa*, une compagnie téléphonique), CATV (*Community Antenna Television*), JNR (*Japanese National Railway*) ou TBS (*Tokyo Broadcasting System*). Pour indiquer les mesures, les poids et les formules chimiques, les Japonais utilisent toujours des abréviations alphabétiques, et ils écrivent généralement entre parenthèses, après le terme japonais correspondant, certaines abréviations internationales courantes, tels GDP (*Gross Domestic Product*, pour «produit intérieur brut»), OPEC, NATO, COMECON.

De plus en plus, des abréviations de mots anglais s'introduisent dans des textes japonais, tels PKO (*Peace Keeping Order*) et FAX, dont l'origine échappe généralement à ceux qui les écrivent ou qui les lisent. Enfin, des mots mixtes s'écrivent à la fois avec des caractères alphabétiques et des caractères chinois. Le plus souvent, les abréviations alphabétiques se prononcent comme en anglais, c'est-à-dire comme s'il s'agissait de lettres anglaises passées par le filtre du kana, indépendamment de la langue dont elles proviennent. Ainsi, la NHK (*Nippon Hoso Kyokai*), l'organisme de radiodiffusion japonais, se prononce [en-eit-kei], CD (*compact disc*) se prononce [si:-di], et BMW, [bi:-em-daburuju:].

Des mots alphabétiques s'ajoutent couramment aux mots traditionnels, dans les textes. Nous avons vu que les caractères kana servaient et servent encore de système de métaécriture ; toutefois, tandis que le *romaji* était un système de signes destinés aux spécialistes il y a un peu plus d'une génération, l'*eiji* est aujourd'hui très populaire. Il est omniprésent dans les publicités écrites. Les enfants japonais apprennent aujourd'hui l'abécédaire à la maternelle ou à l'école bien avant d'apprendre des langues étrangères et indépendamment de cet apprentissage. Le travail quotidien de nombreux Japonais impose l'utilisation de textes écrits alphabétiquement, en japonais ou dans d'autres langues, de sorte que les signes alphabétiques sont de plus en plus fréquents dans les textes japonais, normalement pour représenter des lettres ou des mots étrangers, mais également parfois des mots japonais.

Cette évolution suscite évidemment les critiques des cercles conservateurs. Dans un article qu'il publia



8. La revue *Romaji zasshi*, publiée entre 1885 et 1892 par la Société d'écriture latine, prônait l'écriture de textes japonais avec des caractères latins. Elle parut de nouveau en 1905 sous le titre de *Romaji*.

en 1978, Michio Tsushiya dénonça publiquement la «dépréciation du japonais» et mit en garde ses compatriotes : «La pensée se confondant avec la langue, des mots simples et une écriture simple ne peuvent qu'engendrer que la simplicité d'esprit». La mise en garde paraît peu fondée, même s'il existait vraiment une relation entre l'écriture et la pensée : nous l'avons vu, l'alphabet n'est pas facile à apprendre, et, d'autre part, le système traditionnel japonais ne semble pas menacé par l'usage de l'alphabet, qui enrichit la culture japonaise.

D'autres types d'arguments culturels sont employés par les nationalistes, tel le linguiste Suzuki Takao, qui publia en 1985 un article intitulé «L'accroissement des mots alphabétiques : un signe du déclin de la culture japonaise?». Tout comme certains conservateurs européens, il considère que l'alphabet latin et «l'invasion de mots occidentaux» qu'il provoque menacent la culture japonaise. La presse, également, résiste à l'emploi des signes alphabétiques, mais la lutte est vouée à l'échec, car depuis déjà longtemps, les milieux scientifiques et techniques utilisent les signes alphabétiques comme clef de tri pour les catalogues, répertoires et autres systèmes de compilation ou de classification des informations. Bien que les dictionnaires japonais soient ordonnés conformément au système chinois ou kana, les dictionnaires bilingues rangent les mots clés japonais selon l'ordre alphabétique. Ainsi de nombreux Japonais se sont habitués à rechercher alphabétiquement les termes de leur propre langue. L'informatique moderne a accru cette tendance.

L'ordinateur, cinquième colonne

Les systèmes japonais de traitement de texte proposent soit le système kana, soit le système alphabétique, mais les Japonais préfèrent généralement ce dernier, qui impose pourtant la connaissance de l'écriture des mots japonais en système alphabétique. Les programmes proposent les divers systèmes d'écriture en lettres latines : les entrées *ti* et *chi* par exemple, s'affichent à l'écran et s'impriment sous la forme du même signe kana. Même la représentation des sons accentués (consonnes longues), qui s'écrivent en kana suivis d'un plus petit signe, ne présentent aucune dif-

a	i	u	e	o				
ka	ki	ku	ke	ko	kya	kya	kyo	KWA
sa	si shi	su	se	so	sya sha	syu shu	syo sho	
ta	ti chi	tu tsu	te	to	tya cha	tyu chu	tyo cho	
na	ni	nu	ne	no	nya	nyu	nyo	
ha	hi	hu FU	he	ho	hya	hyu	hyo	
ma	mi	mu	me	mo	mya	myu	myo	
ya		yu		yo				
ra	ri	ru	re	ro	rya	ryu	ryo	
wa				WO				
ga	gi	gu	ge	go	gya	gyu	gyo	GWA
za	zi ji	zu	ze	zo	zya ja	zyu ju	zyo jo	
da	Di	DU	de	do	DYA	DYU	DYO	
ba	bi	bu	be	bo	bya	byu	byo	
n n/m N								

9. LES SYLLABES DU JAPONAIS en trois transcriptions alphabétiques modernes. Les correspondances sont représentées en minuscules. Les éventuelles différences sont marquées en majuscules pour le système *nipponshiki* et en italiques pour le système Hepburn. Diverses syllabes sont représentées par plusieurs signes kana, comme par exemple [o]. En *nipponshiki*, cette différence se voit dans O et WO, tandis que les deux autres systèmes utilisent uniquement o. Voilà pourquoi certaines entrées sont écrites uniquement en majuscules.

ficulté : on peut les introduire sous la forme de doubles consonnes ou les faire précéder d'un L.

L'avènement de l'informatique a donc des conséquences importantes pour les Japonais qui, pour la plupart, identifient les mots par leur représentation graphique ; certains possèdent une prononciation unique, mais beaucoup se prononcent différemment selon le contexte. Lorsque les Japonais utilisent leur langue, ils utilisent des mots dont ils ne savent parfois pas la prononciation de la forme écrite en kanji (les Français ont le même problème, quand ils lisent des mots étrangers tels «software» ou «Dvorak»). L'utilisation de l'alphabet pour la saisie des données informatiques impose aux

Japonais de connaître la prononciation des mots qu'ils veulent écrire ; la prononciation prend ainsi la première place, et relègue au second rang la représentation en caractères chinois. La machine transforme l'entrée alphabétique en signes kanji ou kana cohérents. En cas d'homophonie (des mots qui se prononcent de la même façon, mais dont les significations sont différentes), elle propose à l'utilisateur diverses possibilités : l'utilisateur doit donc maîtriser un peu le système kanji. L'emploi des systèmes de traitement de texte modifiant profondément le comportement linguistique des Japonais, le rôle de l'alphabet dans la langue japonaise devrait avoir une importance croissante dans les prochaines années.

Florian COULMAS est professeur de linguistique à Tokyo.

Tanaka AKITSU, *Japanese Writing and the Romaji Movement*, in *The Eastern Press*, Londres, 1920.

J.M. UNGER, *Japanese Orthography in the Computer Age*, in *Visible Language*, vol. 18, n° 3, pp. 238-253, 1984.

Florian COULMAS, *The Writing System of the World*, Blackwell, Oxford, 1989.

C. SEELEY, *A History of Writing in Japan*, E.J. & Brill, Leyde, 1991.

Nanette TWINE, *Language and the Modern State. The Reform of Written Japanese*, Routledge, Londres, New York, 1991.

La science de la loi de Murphy

ROBERT MATTHEWS

*Les désagréments de la vie quotidienne
ne sont pas le fruit du hasard :
la vérité est que le monde entier
vous en veut personnellement.*

Vous êtes en retard, vous cherchez frénétiquement deux chaussettes identiques dans votre tiroir. Dans la cuisine, votre tranche de pain grillé tombe par terre, évidemment la face beurrée contre le sol. Enfin, vous êtes sorti, vous arrivez à la gare, vous vous mettez dans une file pour acheter votre billet, et vous voyez les deux autres files avancer à grands pas, tandis que vous restez cloué au sol, derrière une personne qui achète un billet pour faire le tour du monde en train !

Ce ne sont que des coïncidences malencontreuses, rien de plus ! À moins que quelque chose dans le fonctionnement de l'Univers ne favorise ce type de coïncidences malheureuses ? Hélas, la seconde hypothèse semble la bonne : de toute évidence, l'Univers est contre vous.

Cette idée est ancrée dans la croyance populaire, et elle est connue sous le nom de loi de Murphy ; on peut la résumer en affirmant que, «si un ennui peut survenir, il surviendra». Toutefois, si la plupart des non-scientifiques n'ont jamais douté de la véracité de cette loi, les scientifiques n'y voyaient que le fruit de notre mémoire sélective pour les événements désagréables. Pourtant les scientifiques se sont trompés. En me fondant sur des analyses mathématiques et scientifiques, de la théorie des probabilités à la dynamique des corps, j'ai étudié la loi de Murphy, et

Dessins : J. Gassim, Photos : J. Gassim, Montage : J. Gassim

1. UN JOUR DE MALCHANCE : il a pris son parapluie, mais ne l'utilisera pas, il n'a pu trouver deux chaussettes appariées, et il a choisi la mauvaise place pour se reposer sous l'arbre.

L'horrible vérité est que les célèbres manifestations de cette loi ont une explication scientifique.

La version la plus connue de la loi a 50 ans à peine, mais l'idée essentielle qu'elle sous-tend a plusieurs centaines d'années. En 1786, un poète écossais, Robert Burns, fut le premier à mettre la loi en vers. En 1884, l'humoriste victorien James Payn décrivit sans doute le plus célèbre exemple de la loi de Murphy :

*Je m'étais fait du pain grillé,
Une tranche longue et beurrée,
Mais elle tomba sur le sol souillé,
Sa face beurrée contre lui tournée.*

Murphy, première victime de sa loi

La version moderne de la loi de Murphy est née des études menées par les forces aériennes américaines sur l'effet des décélérations rapides sur les pilotes. Des volontaires étaient attachés sur un traîneau propulsé par une fusée et placé en haut d'une falaise. Des électrodes placées sur un harnais dessiné par le capitaine Edward Murphy devaient enregistrer les réactions des pilotes.

On pratiqua des tests durant toute une journée, puis on s'aperçut, le lendemain, que les dispositifs d'enregistrement n'avaient pas fonctionné. Murphy découvrit qu'aucune de ses électrodes n'avait été correctement branchée. Il déclara : « Quand on a le choix entre plusieurs options et que l'une d'elles peut aboutir à une catastrophe, quelqu'un choisira forcément cette solution. »

Lors d'une conférence de presse, l'observation de Murphy fut présentée par les ingénieurs comme une excellente hypothèse de travail dans les projets où les questions de sécurité sont cruciales. Ensuite, le principe de Murphy fut transformé en un énoncé léger sur les contrariétés quotidiennes. Murphy fut la première victime de sa loi, dont on déforma le sens.

En 1994, je m'intéressai pour la première fois à la loi de Murphy, après avoir lu qu'un livre posé sur un bureau face en l'air se retrouve presque toujours face contre terre : le livre et la tartine beurrée obéissent-ils aux mêmes lois physiques ?

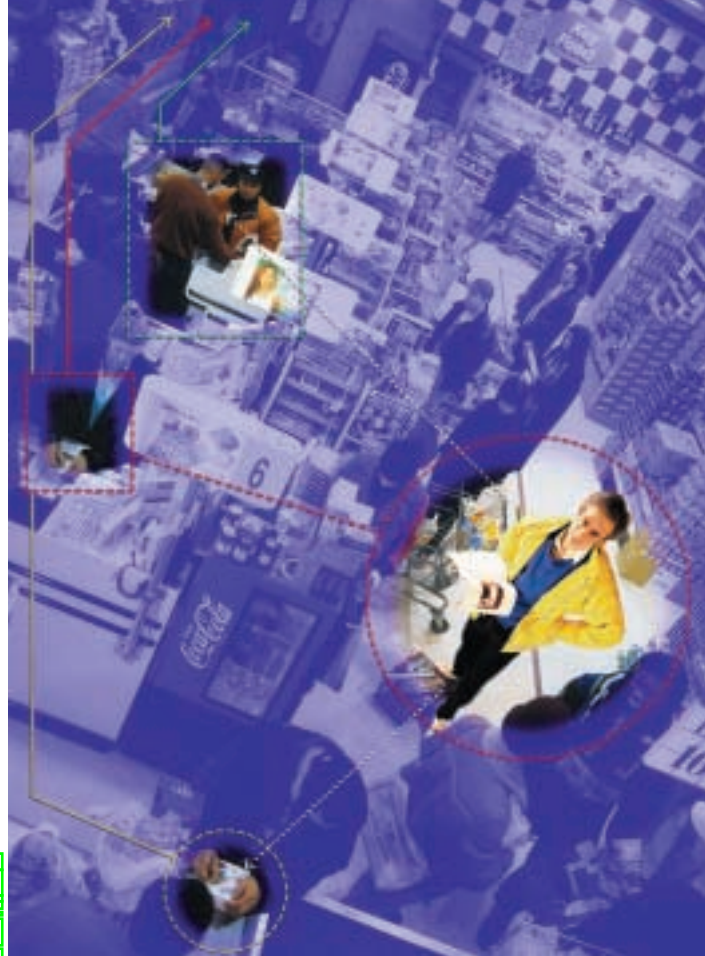
Ma première réaction fut celle de n'importe quel scientifique : je pensai que le livre avait autant de chances de tomber sur l'une ou l'autre face et qu'il suffisait de multiplier l'expérience

pour le démontrer. C'est ce que j'ai fait et j'ai dû admettre que le comportement d'un livre qui tombe n'est pas aléatoire. Sa vitesse de rotation était à l'évidence insuffisante pour lui permettre de faire un tour complet sur lui-même et pour retomber face vers le haut : diverses mesures et des calculs du mouvement du livre (ou de la tartine) assimilé à une plaque rigide, dure et mince ont confirmé que la force de gravité n'accélère pas suffisamment le livre (ni la tartine beurrée) pour qu'il fasse un tour complet sur lui-même.

La tartine beurrée

Par la suite, j'ai découvert que d'autres avaient publié – des années auparavant – des analyses semblables sur la chute des tartines beurrées. J'ai alors découvert un phénomène très étrange : une relation entre la dynamique de la tartine beurrée et la constante fondamentale de la nature.

En un mot, les tartines beurrées ne tomberaient pas sur la face beurrée si elles étaient posées sur des tables suffisamment hautes. Pourquoi les tables ont-elles la hauteur qu'elles ont ? Parce qu'elles sont utilisées par des êtres humains. Continuons à nous interroger : pourquoi les hommes



2. QUELLE SERA LA FILE la plus rapide ? La théorie des probabilités explique pourquoi ce ne sera vraisemblablement pas la vôtre.

ont-ils la taille qu'ils ont ? Il y a quelques années, William Press, professeur d'astrophysique à l'Université Harvard, découvrit qu'en tant que bipèdes les humains tombent facilement. Or, si nous étions plus grands, nous aurions plus de risques de nous fracasser le crâne chaque fois que nous tombons.

Les critères de Cassandra

- Dès qu'un événement désagréable peut se produire, il se produit.
- Une expérience peut être considérée comme un succès quand on n'est pas obligé d'éliminer plus de la moitié des données expérimentales pour valider la théorie.
- Toutes les constantes sont variables.
- Dans tout calcul compliqué, un facteur du numérateur passera toujours au dénominateur.
- Le résultat qui semble, de toute évidence, le meilleur sera source d'erreurs.
- Tout fil coupé à la bonne longueur sera toujours trop court pour l'expérience.
- Des unités identiques testées dans des conditions identiques ne seront jamais identiques.

- La disponibilité d'un objet est inversement proportionnelle au besoin que l'on en a.
- La meilleure façon de retrouver un objet perdu, c'est d'en acheter un nouveau.
- Si, dans un article scientifique, le sens d'un mot vous échappe, ignorez-le. Le texte est tout aussi compréhensible sans ce mot.
- Une personne qui continue à sourire quand tout va mal pense à quelqu'un sur qui rejeter la faute.
- Des récipients hermétiques fuient toujours.
- Quand vous aurez fini de monter un appareillage, vous retrouverez toujours des pièces inutilisées.
- Des éléments d'un dispositif qui ne doivent ou ne peuvent pas être assemblés, le seront.

Ainsi, notre taille résulte d'un équilibre entre les liaisons chimiques qui rigidifient notre crâne et la force de gravité qui nous attire vers le sol.

Ces forces sont elles-mêmes soumises à diverses constantes fondamentales, par exemple la charge de l'électron, dont les valeurs ont été fixées au cours du Big Bang cosmique, qui eut lieu il y a environ 15 milliards d'années. Utilisant le même type d'hypothèses que W. Press, j'ai calculé que les hommes ne pourraient pas dépasser trois mètres de hauteur ; de tels êtres humains auraient des tables dont la hauteur ne permettrait pas à une tartine beurrée de faire un tour complet sur elle-même et de retomber face beurrée vers le haut. Les tartines semblent se retourner sur la face beurrée simplement parce que l'Univers est conçu pour qu'il en soit ainsi.

Après que j'eus publié ce résultat, en 1995, on m'a demandé d'expliquer d'autres aspects de la loi de Murphy : pourquoi le temps est-il toujours médiocre le dimanche, ou encore pourquoi tombe-t-on toujours en panne quand on se rend à un rendez-vous important ? Malheureusement, ces exemples sont faux ou anecdotiques, et l'on ne peut les étudier en détail. Pour certains, comme les pannes, «la mémoire sélective» semble parfaitement s'appliquer. J'ai pourtant trouvé des exemples de la loi de Murphy que l'on peut analyser.

Une des manifestations du principe de Murphy assez facile à expliquer est la loi de Murphy des cartes, que l'on peut résumer de cette façon : «Vous voulez vous repérer sur une carte ; si le village que vous cherchez peut se nichier sur une partie illisible de la carte, il le fera.» Cette propriété tient d'une intéressante combinaison entre probabilités et illusions d'optique. Supposons que la carte soit carrée : la «zone de Murphy» est localisée près des bords de la carte, et vers le pli central, où les routes sont mal dessinées.

Par des calculs géométriques simples, on montre que, si la largeur de la zone de Murphy est égale au dixième du côté de la carte ($a/10$), cette zone occupe plus de la moitié de la carte (c'est la surface d'une bande de largeur $a/10$ qui borde la carte et recouvre les deux plis centraux). Au total, un point quelconque de la carte a une chance sur deux de se situer dans la zone de Murphy.

Un autre exemple de la loi de Murphy est celle des files d'attente : vous



3. D'APRÈS LES PRINCIPES de l'analyse combinatoire, les chaussettes dépareillées s'accumulent nécessairement.

êtes toujours dans la file qui avance moins vite que les autres. Bien sûr, si vous êtes derrière une famille de douze personnes faisant les provisions pour l'hiver, on peut comprendre que les autres files iront plus vite. Que se passe-t-il quand votre file a la même longueur et la même composition que les autres ? Échapperez-vous, dans ces conditions à la loi de Murphy ? Désolé, mais non. En moyenne, toutes les queues iront quasiment à la même vitesse, chacune risquant, comme les autres, d'être retardée par un caissier qui doit changer le rouleau de papier de la caisse ou par un client dont la carte bleue ne fonctionne pas. Toutefois, dans un supermarché, peu importe la moyenne, vous voulez être le premier sorti. La probabilité que vous ayez choisi la file qui ira le plus vite est égale à $1/N$, où N est le nombre de caisses du supermarché.

Si vous ne comparez votre file d'attente qu'à celle de gauche et à celle de droite, vous n'avez qu'une chance sur trois de «gagner». En d'autres termes, deux fois sur trois, la file de gauche ou celle de droite va plus vite.

Murphy, la carte routière, la chaussette et le parapluie

La théorie des probabilités et la théorie combinatoire permettent au mathématicien de répondre à une autre question posée par la loi de Murphy : «Pourquoi les chaussettes dépareillées ont une probabilité d'apparition particulièrement élevée ?» Essayons de comprendre pourquoi les chaussettes dépareillées sont majoritaires. Imaginons un tiroir rempli de chaussettes appariées. Supposons maintenant qu'il

manque une chaussette (peu importe quand elle a été perdue et où elle l'a été). Désormais une chaussette non appariée erre dans le tiroir. Puis une seconde chaussette vient à être perdue. Il s'agit de la chaussette isolée ou, plus vraisemblablement, d'une des deux chaussettes d'une paire.

Or la perte aléatoire d'une chaussette tend toujours à créer le nombre maximum de chaussettes dépareillées. Imaginons que l'on ait 10 paires de chaussettes. Quand nous aurons perdu la moitié des chaussettes, la probabilité que l'on n'ait plus que des chaussettes dépareillées sera quatre fois supérieure à la probabilité d'avoir des chaussettes appariées dans le tiroir. La solution la plus probable est qu'il restera seulement deux paires complètes au milieu de six chaussettes dépareillées. Pas étonnant qu'il soit si difficile de trouver une paire de chaussettes le matin !

Selon un autre dogme issu de la loi de Murphy : «Prendre son parapluie réduit les risques d'averse.» La précision des prévisions météorologiques atteint aujourd'hui 80 pour cent : en prenant un parapluie, on a quatre chances sur cinq de faire le bon choix quand la pluie est annoncée. Toutefois, supposons que la probabilité qu'il ne pleuve pas pendant votre promenade soit dix fois supérieure au risque qu'il pleuve. Selon la théorie des probabilités, même une prévision fiable à 80 pour cent a deux fois plus de risques d'être fautive que d'être vraie durant votre promenade. Des prévisions, même fiables globalement, n'autorisent pas la prévision des événements locaux.

Le capitaine Murphy fut sans doute navré des détournements de son principe. Toutefois, je suis convaincu que les scientifiques devraient s'intéresser davantage aux différentes manifestations de la loi de Murphy, que l'on peut expliquer par diverses théories de la physique et des mathématiques, de la dynamique des corps à la théorie des probabilités. La principale leçon que l'on peut tirer de la loi de Murphy est la démonstration éclatante que des phénomènes apparemment triviaux n'ont pas toujours des explications simples.

Robert MATTHEWS est chercheur dans le département informatique de l'Université Aston, à Birmingham, et journaliste scientifique au *Sunday Telegraph*.

Les machines à sous

En France, les recettes des casinos se sont élevées à près de huit milliards de francs en 1995-1996 : 87 pour cent de cette somme provient de pièces utilisées dans les machines à sous (aux États-Unis, ce sont près de 90 milliards de francs par an, dont 65 pour cent proviennent des machines

à sous). Ces machines sont des ordinateurs rudimentaires : les ressorts, les engrenages et les poids que l'inventeur, Charles Fey, a assemblé au début du siècle dans sa machine *Liberty Bell*, le prototype de la machine à sous à trois rouleaux, ont laissé la place à une carte électronique avec des microprocesseurs et des mémoires électroniques.

Chaque rouleau peut s'arrêter dans 22 positions (certains en ont 32), de sorte que le nombre total de combinaisons atteint 10 648 (22^3). Lorsque les machines à sous étaient uniquement mécaniques, la probabilité de chaque combinaison était de 1/10 648. Aujourd'hui, on trouve au

cœur de ces machines un microprocesseur qui engendre des nombres aléatoires, lesquels sont associés à chaque combinaison. Le microprocesseur commande l'affichage et le paiement. Le fabricant peut ainsi associer des probabilités fortes ou faibles à chaque combinaison affichée. Par exemple, il règle la machine de sorte que la somme la plus élevée (le «superjackpot») ne sorte qu'une fois tous les dix millions de tirages.

Avec ces probabilités, les sommes proposées pour le jackpot s'élèvent à plusieurs millions de francs. Ces sommes importantes attirent de plus en plus de joueurs vers les bandits manchots.

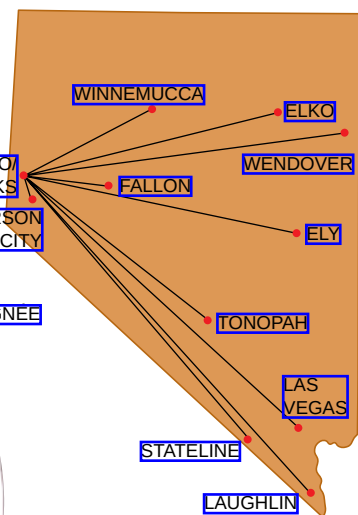
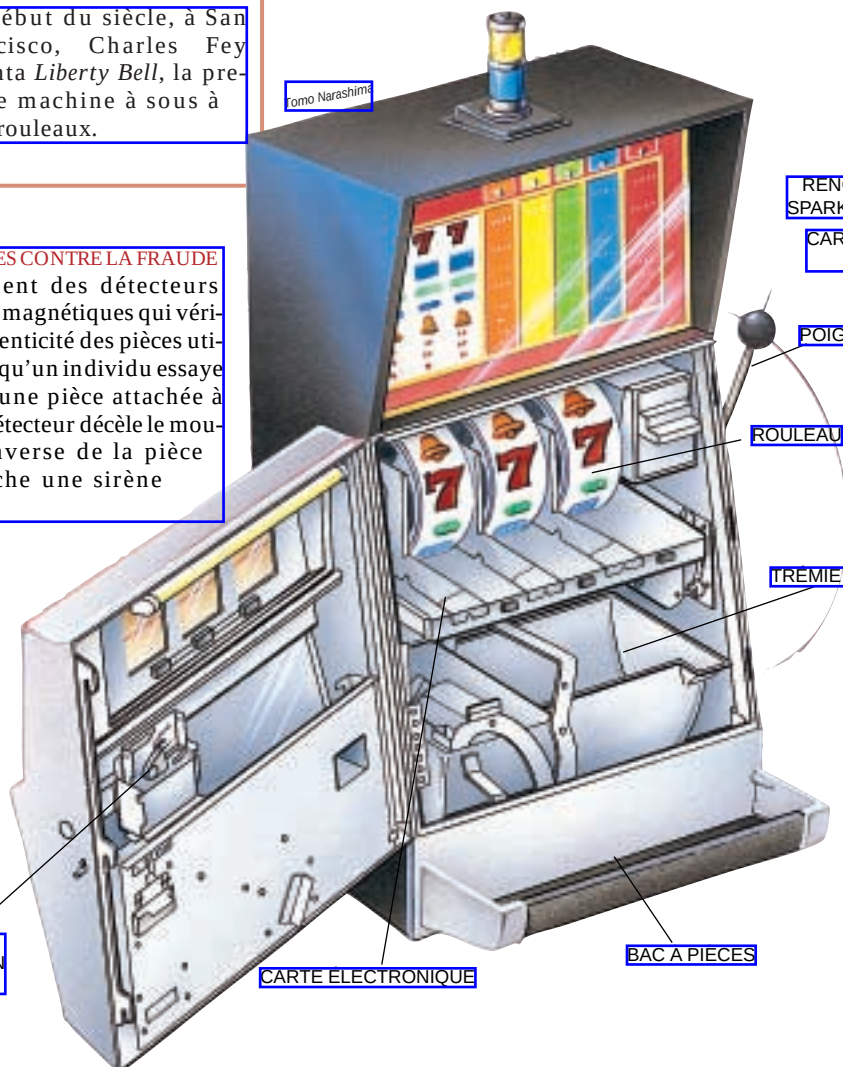


LIBERTY BELL

Au début du siècle, à San Francisco, Charles Fey inventa *Liberty Bell*, la première machine à sous à trois rouleaux.

LES MESURES CONTRE LA FRAUDE comprennent des détecteurs optiques et magnétiques qui vérifient l'authenticité des pièces utilisées. Lorsqu'un individu essaye de retirer une pièce attachée à un fil, un détecteur décèle le mouvement inverse de la pièce et déclenche une sirène d'alarme.

UN MICROPROCESSEUR commande la rotation des rouleaux (dans une machine vidéo, une image simule le mouvement des rouleaux). Ce microprocesseur engendre également des nombres aléatoires qui correspondent à des combinaisons de symboles sur les rouleaux (comme les cerises, les barres ou les «jackpots»). Lorsqu'une combinaison gagnante sort, la trémie tourne et fait tomber le gain dans le bac à pièces.



LA MISE EN RESEAU, par les lignes téléphoniques qui traversent l'État du Nevada, coordonne les paris et les gains de centaines de machines à sous réparties dans tout l'État. Chaque fois que l'on joue sur une machine, le jackpot de toutes les machines connectées augmente. En octobre 1995, ce système de jeu progressif a conduit à un gain supérieur à 50 millions de francs, le plus gros de l'histoire des machines à sous.

Sable et géométrie

ROGER ISS

En attendant les plages de l'été, faisons des tas de sable mathématiques.

Quand on verse du sable sur une plaque plane, horizontale et surélevée, il s'entasse, tandis que le sable excédentaire coule le long des bords. Quelle sera la forme du tas ? Si le contour de la plaque est un polygone convexe, on obtient finalement un tas polyédrique, limité par des faces planes qui passent chacune par un des côtés du polygone et qui font toutes le même angle aigu avec le plan horizontal (cet angle est de l'ordre de 30 à 35 degrés). Chaque arête de ce polyèdre est commune à deux faces, et chaque sommet est généralement commun à trois faces (et donc à trois arêtes) ; un sommet peut aussi appartenir à plus de trois arêtes, le cas extrême étant celui de la pyramide, dont le sommet unique est commun à toutes les arêtes.

Ainsi un tétraèdre s'établit sur une plaque triangulaire. Avec une plaque à quatre côtés, on obtient parfois une pyramide, parfois un «toit» à quatre pans. Dans cet article, nous ne nous intéresserons qu'aux tas dont aucun sommet n'est commun à plus de trois arêtes (à

l'exception de 3 et 4 côtés pour le quadrilatère, et une succession de faces à 3, 4, 4, 3, 5 côtés pour le pentagone.

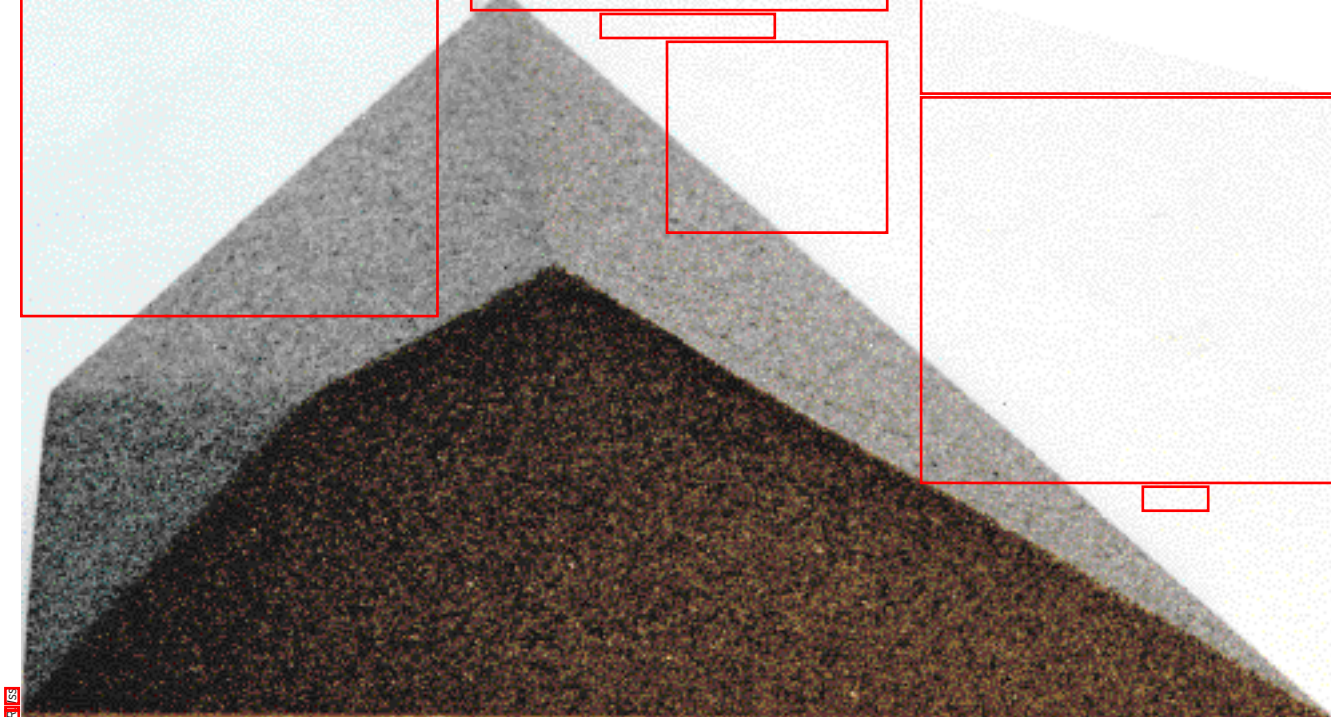
Puis, quand on passe à la plaque hexagonale, c'est la surprise : selon sa forme, on obtient trois types de tas de sable distincts par la nature de leurs faces et par leur répartition. Sur les schémas 3 c, d, e, on voit que ces trois tas ont respectivement des successions de faces à 3, 4, 5, 3, 4, 5 côtés ; 3, 4, 4, 4, 3, 6 côtés ; 3, 5, 3, 5, 3, 5 côtés.

Quels tas obtient-on pour des plaques ayant plus de six côtés ? Contentons-nous de dessiner les tas de sable en projection orthogonale sur le plan horizontal. Chaque arête d'un tas de sable étant l'intersection de deux faces de même pente, elle se projette sur le plan horizontal selon la bissectrice de l'angle formé par les côtés correspondants du polygone de base lorsqu'ils se coupent (ou leur prolongement) ; si ces côtés sont parallèles, l'arête se projette sur la parallèle équidistante de ces deux côtés. Saurez-vous le démontrer (les lecteurs recevront la solution en envoyant

l'étude des tas de sable en les dessinant, mais l'imprécision, qui augmente avec le nombre de côtés, nous pousse à abandonner l'expérience et à passer à la théorie. Commençons par convenir qu'un «polyèdre tas de sable» est un polyèdre convexe dont une face, nommée base, a un côté commun avec chacune des autres faces et fait le même angle aigu avec chacune d'elles. À partir de cette définition, nous pourrions démontrer toutes les propriétés des tas de sable observées expérimentalement, mais un bon mathématicien cherche toujours à généraliser une définition, c'est-à-dire à «plonger» l'ensemble des objets qu'il considère dans un ensemble plus vaste ; l'étude de l'ensemble élargi donne souvent des indications utiles pour le problème initial.

LES TECTOÈDRES

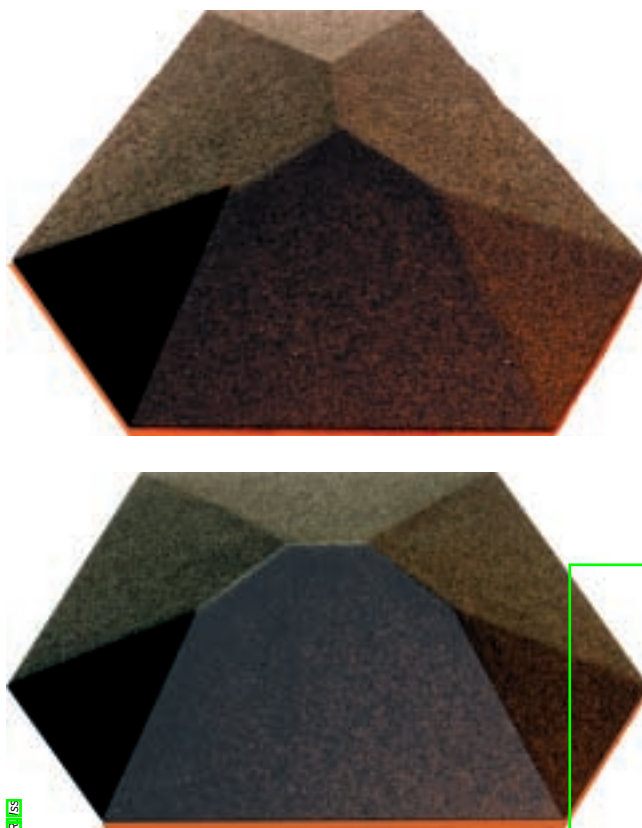
Or, dans la définition des tas de sable, il y a une contrainte dont on peut se libérer : l'égale inclinaison des faces. Pour généraliser les tas de sable, imaginons des tas dont les faces auraient des pentes différentes (nous pourrions les fabriquer en terre glaise ou en pâte à modeler, en découpant les faces avec un couteau). Leur dessin en projection horizontale est alors plus facile que pour les tas de sable, car les projections des arêtes ne sont plus des bissectrices. Pour ces dessins, il suffit de respecter deux règles : si une arête est l'intersection des faces déterminées par deux côtés de la base, elle passe par le point



1. Tas de sable confectionné sur un quadrilatère.

Quand on fabrique les tas de sable, on constate qu'ils ont toujours au moins deux faces triangulaires. Peut-on maintenant le démontrer ?

Parmi les arêtes, on en distingue deux types : celles qui sont issues d'un sommet de la base et communes à deux faces adjacentes, que nous nommerons arêtes latérales ; et celles qui joignent deux sommets n'appartenant pas à la base, que nous nommerons arêtes sommitales (voir la figure 4). De même, on distingue trois types de sommets (en dehors de ceux de la base), selon le type des arêtes qui en sont issues : de type 1, quand deux des arêtes sont latérales et la troisième sommitale (une des faces auxquelles un tel sommet appartient est un triangle) ; de type 2, quand une arête est latérale et les deux autres sommitales ; de type 3 quand les trois arêtes issues de ce sommet sont sommitales (plus de trois arêtes ne peuvent être latérales que dans les cas écartés).



2. Deux des trois types de tas de sable qui s'édifient sur des plaques hexagonales.

Considérons maintenant un tectoèdre d'ordre n supérieur à 3, et notons S_1, S_2, S_3 le nombre de ses sommets respectivement de type 1, 2, 3. Le nombre des arêtes latérales se déduit directement du nombre des sommets de types 1 et 2 : il est égal à $2S_1 + S_2$. De surcroît, comme il passe exactement une arête latérale par chaque sommet de la base, le nombre d'arêtes latérales est égal à n ; donc $2S_1 + S_2 = n$.

Combien le tectoèdre possède-t-il d'arêtes sommitales ? Quand on ajoute les nombres d'arêtes sommitales pour tous les sommets, on trouve $S_1 + 2S_2 + 3S_3$, mais, dans ce total, chaque arête sommitale est comptée deux fois. Aussi le nombre d'arêtes sommitales est-il égal à $(S_1 + 2S_2 + 3S_3)/2$, ce que l'on peut encore écrire, à l'aide de la relation précédemment trouvée : $n + 3(S_3 - S_1)/2$.

En faisant ces dénombrements pour le tectoèdre (base comprise), on trouve que le nombre total S des sommets est $2n + S_3 - S_1$; celui A des arêtes est $3n + 3(S_3 - S_1)/2$, et celui F des faces est $n + 1$. Or le mathématicien suisse Leonhard Euler (1707-1783) a démontré que, pour un polyèdre, ces trois nombres sont liés par la relation $F + S - A = 2$. En remplaçant les nombres F, S, A par leur valeur, nous trouvons ici : $S_1 = S_3 + 2$.

On en déduit que S_1 est supérieur ou égal à 2, et l'on obtient ainsi la confir-

mation de la surprenante observation précédente : tout tectoèdre a, au moins, deux faces triangulaires. En outre, les nombres A et S deviennent alors respectivement $2n - 2$ et $2n - 3$: dans un tectoèdre d'ordre n , il existe, quelle que soit sa forme, $n - 2$ sommets autres que ceux de la base et $n - 3$ arêtes sommitales. N'est-ce pas étonnant que ces deux nombres soient indépendants de la forme du tectoèdre, et ne dépendent que du nombre de sommets de sa base ?

TRONCATURE TRIANGULAIRE

Imaginons, comme précédemment, que le tectoèdre étudié soit en terre glaise et posé sur une table. Avec un couteau, coupons une « pointe » de ce solide, par une coupe plane jusqu'au ras de la table. En enlevant le petit tétraèdre ainsi détaché (voir la figure 7), on obtient encore un tectoèdre ayant une nouvelle face triangulaire.

De façon plus mathématique, considérons un sommet S de la base d'un tectoèdre d'ordre n . Sur chacune des trois arêtes issues de S , choisissons respectivement trois points A, B, C , puis enlevons au tectoèdre initial le tétraèdre $SABC$ ainsi défini. Le solide restant est encore un tectoèdre, mais d'ordre $n + 1$. Cette

opération de « troncature triangulaire » nous permet d'obtenir des tectoèdres d'ordre aussi élevé que l'on veut, à partir d'un tectoèdre donné.

Inversement, considérons sur un tectoèdre une face triangulaire ABC , où BC est un côté de la base, et supposons que les deux côtés de cette base, adjacents au côté BC , se coupent en un point S extérieur au polygone de base. Les points S, A, B, C déterminent un tétraèdre. En le collant au tectoèdre initial, on obtient encore un tectoèdre, mais cette fois d'ordre $n - 1$: c'est l'opération inverse de la troncature triangulaire.

On démontre, en effet, que, pour une au moins des faces triangulaires, cette opération est possible. La seule impossibilité se présente pour un tectoèdre d'ordre quatre, dont la base est un trapèze et l'arête sommitale parallèle au plan de base (voir la figure 6) : le point S considéré précédemment n'existe pour aucune de ses deux faces triangulaires. Ce polyèdre ne peut manifestement pas être obtenu par troncature d'un tétraèdre, puisque ce dernier n'a pas d'arête parallèle au plan de base. Par conséquent, tous les tectoèdres descendent d'un tétraèdre par des troncatures successives, sauf ceux dont une arête est parallèle au plan de base, et qui descendent alors du tectoèdre d'ordre quatre précédent.

LA FORMULE D'UN TECTOÈDRE

Dans notre recherche des types de tas possibles, sur une plaque polygonale donnée, nous nous intéressons moins à la forme des tectoèdres qu'à la répartition de leurs faces et au nombre de leurs côtés. Ces informations sont faciles à décrire par un code numérique : marquons sur chacune des faces le nombre des arêtes sommitales qui la limitent (c'est le nombre de ses côtés diminué de trois unités), soit 0 pour une face triangulaire, 1 pour une face à quatre côtés, etc. Lisons ces nombres dans l'ordre où ils se présentent quand on parcourt le polygone de base dans un certain sens. On obtient ainsi une suite de nombres entiers, par exemple 1, 1, 0, 2, 0 pour le tectoèdre de la figure 5.

Évidemment, une telle suite n'est pas unique : elle peut être commen-

cycle. En outre, comme on convient de ne pas distinguer un tectoèdre de son symétrique par rapport à un plan (son image dans un miroir), la suite peut être lue dans n'importe quel sens. Convenons de classer toutes les écritures de cette suite par ordre lexicographique, comme le sont les mots dans un dictionnaire : si deux suites diffèrent par leur premier terme, la plus grande est celle qui a le plus grand premier terme ; si elles commencent par deux termes égaux, la plus grande est celle qui a le plus grand deuxième terme ; etc. Ne conservons que la plus grande de toutes ces suites, et nommons-la for-

mule du tectoèdre. Ainsi, des cinq suites 11020, 10201, 02011, 20110 et 01102 associées au tectoèdre précédent, on ne retient que 20110 ; c'est la formule de ce tectoèdre.

La troncature a un effet simple sur la formule d'un tectoèdre. Elle crée une face triangulaire qui s'intercale entre deux faces adjacentes, dont le nombre des arêtes sommitales augmente d'une unité, leur arête latérale commune étant devenue sommitale : ainsi, dans la formule, un zéro s'introduit entre deux termes consécutifs, et les deux nombres ainsi séparés augmentent d'une unité (on n'oubliera pas que ces formules sont

cycliques, et que le premier et le dernier terme sont consécutifs dans le cycle).

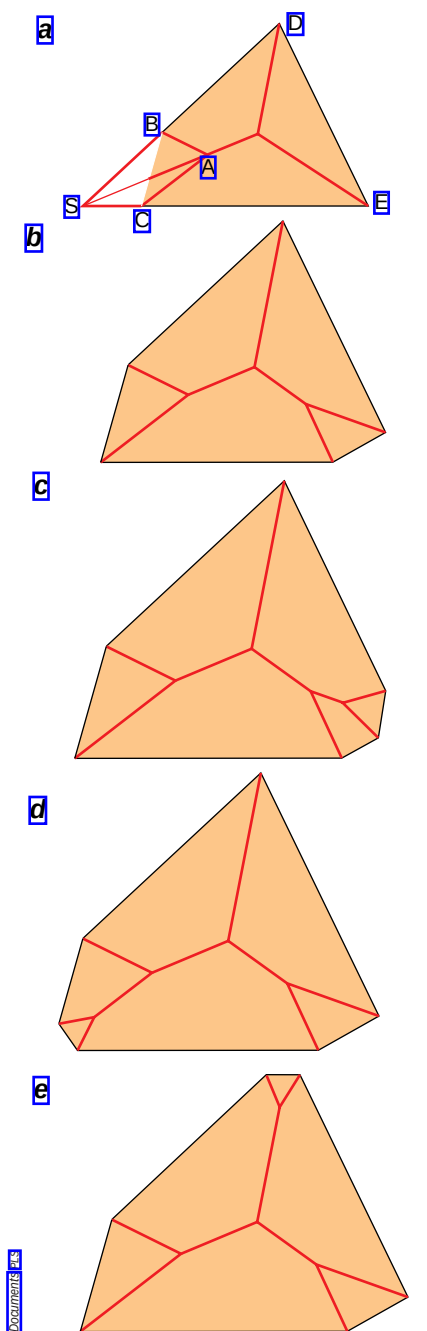
L'opération inverse a également un effet simple : elle correspond à la suppression d'un zéro, dans la formule, et à la diminution d'une unité des deux nombres qui l'encadrent (ce qui est toujours possible, puisque les formules ne comportent jamais deux zéros consécutifs : on démontre que deux faces triangulaires ne sont jamais adjacentes, sauf dans le cas du tétraèdre et dans des cas particuliers qui ont été écartés).

Comment dessiner un tectoèdre ou un tas de sable, connaissant sa formule ? Observons tout d'abord que le nombre de termes de la formule donne le nombre de côtés du polygone de base. Il suffit de remonter la formule, par des suppressions de zéros, jusqu'à celle du tétraèdre, en notant les formules intermédiaires. Celles-ci constituent en effet un « programme » des troncatures successives à effectuer, à partir du tétraèdre, pour parvenir au tectoèdre ou au tas de sable cherché.

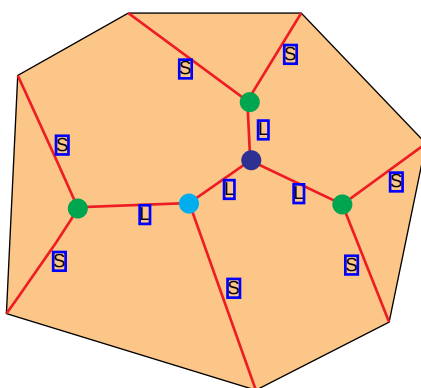
Par exemple, dans la formule 20110, si on supprime le 0 en deuxième position, on obtient 1010 ; puis on répète l'opération pour le 0 en deuxième position de cette nouvelle formule, et l'on trouve 000, qui est la formule du tétraèdre. Chaque formule définit donc une classe de tectoèdres, donc aussi de tas de sable, dont les faces sont réparties de la même manière, avec le même nombre de côtés. Comme un polygone de base donné détermine un seul tas de sable, la classification des tas de sable par leur formule est aussi une classification des polygones convexes : deux polygones appartiennent à la même classe si les tas de sable qui se forment sur eux ont la même formule.

A l'aide des transformations de formule associées à la troncature et à son opération inverse, notre étude des diverses formes de tas de sable devient purement numérique. Malheureusement, si cette méthode donne bien toutes les formules d'ordre n à partir de celles d'ordre $n - 1$, elle les donne avec des répétitions, la même formule pouvant être obtenue plusieurs fois, à une permutation ou à une inversion près. En intercalant des zéros dans la formule 20110 du tectoèdre d'ordre cinq, on obtient les cinq suites : 301110, 210210, 202020, 201201, 030111, qui se ramènent aux trois formules 301110, 210210, 202020. Ce sont les trois variétés de tectoèdres d'ordre six que nous avons trouvées en faisant des tas de sable.

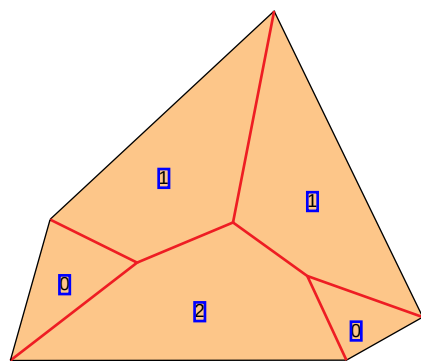
Combien existe-t-il de variétés de tectoèdres, pour les valeurs de n supérieures à six ? Pour les tectoèdres à base heptagonale ou octogonale, on parvient



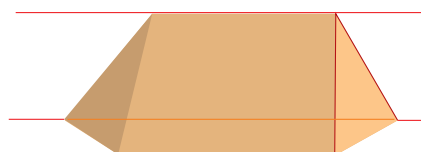
3. Projection de tas de sable sur un plan horizontal.



4. Les sommets sont de trois types, selon la nature des arêtes qui y convergent : de type 1 (en vert) quand deux arêtes sont latérales (elles sont issues de sommets du polygone de base) et une arête est sommitale (entre deux sommets qui n'appartiennent pas au polygone de base), de type 2 (en bleu ciel) quand deux arêtes sommitales et une arête latérale y convergent, et de type 3 (en violet) quand il est commun à trois arêtes sommitales.



5. On représente un tectoèdre par sa formule. Pour établir cette dernière, on numérote 0 les faces triangulaires, 1 les faces à quatre côtés, 2 les faces pentagonales, etc. Ainsi la formule du tectoèdre ci-dessus est 20110.



6. Le seul tectoèdre qui ne s'obtient pas par troncature à partir d'un tétraèdre.

encore à effectuer l'opération précédente à la main, mais le travail est rapidement fastidieux, et un ordinateur s'impose. Voici, pour les valeurs de n comprises entre 6 et 15, le nombre de formules que l'on peut respectivement déterminer : 3, 4, 12, 27, 82, 228, 733, 2282, 7528, 24834.

Les temps de calcul augmentent rapidement avec n , et même un ordinateur puissant finit par s'essouffler. Nous devons nous contenter de calculer le nombre des classes de tectoèdres en fonction de leur ordre, sans chercher à déterminer leur formule. Un détour nous y conduit, de façon inattendue.

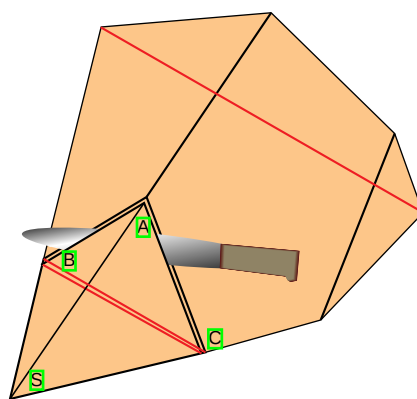
DUALITÉ

Depuis Euler, on sait associer à un polyèdre donné un autre polyèdre, nommé dual du premier, en opérant de la façon suivante : on marque un point dans chaque face et on relie par un segment les points qui sont situés dans des faces ayant une arête commune. Ainsi le dual d'un cube est un octaèdre, et réciproquement. Pour les tectoèdres, nous opérerons de manière un peu différente, en ne tenant pas compte de la base.

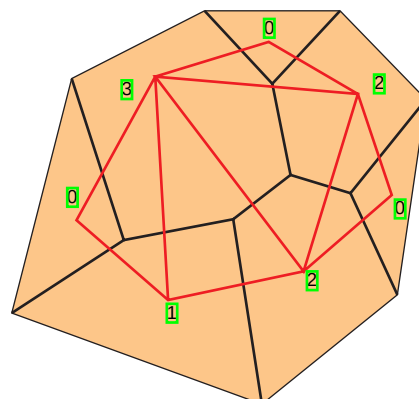
On peut alors faire la construction indiquée précédemment sur la projection du tectoèdre. Le résultat obtenu (voir la figure 8) est assez surprenant : c'est le dessin d'un polygone où sont tracées des diagonales. Les côtés de ce polygone correspondent aux arêtes latérales du tectoèdre (ils les coupent), et les diagonales à ses arêtes sommitales (elles les coupent). En outre, les diagonales partagent ce polygone en triangles dont les sommets sont ceux du polygone lui-même et qui ont, en commun avec lui, deux côtés, un seul côté ou aucun, selon qu'ils contiennent un sommet de type 1, 2 ou 3. Autrement dit, le problème initial de géométrie à trois dimensions se ramène à un problème de géométrie plane, celui de la triangulation des polygones.

Tout ce qui a été démontré pour les tectoèdres a un énoncé dual valable pour cette triangulation. Considérons, par exemple, la formule d'un tectoèdre : puisque ses termes indiquent le nombre des arêtes sommitales des différentes faces, ils indiquent aussi le nombre des diagonales issues des sommets du polygone dual. Autrement dit, la formule d'un tectoèdre caractérise aussi la triangulation du polygone associé par dualité.

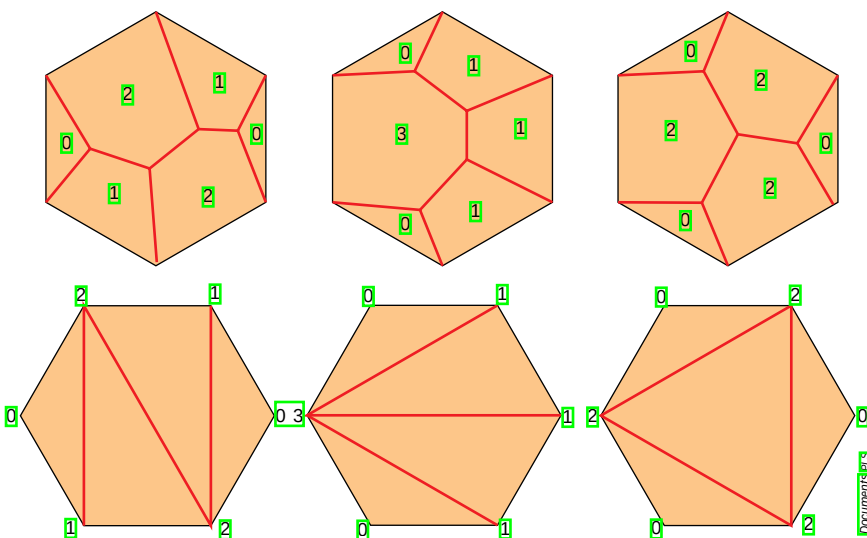
L'opération duale de la troncature est l'adjonction au polygone triangulé d'un triangle supplémentaire ayant pour base un côté du polygone. Cette adjonction provoque l'apparition d'un sommet d'où



7. Les troncatures font apparaître des faces triangulaires.



8. Un tectoèdre et le dual de sa projection (en rouge).



9. Les trois tectoèdres que l'on peut construire sur un hexagone régulier (en haut) et les trois triangulations de ces tectoèdres (en bas). En haut, les nombres repèrent le nombre d'arête sommitales de faces ; en bas, ils correspondent au nombre de diagonales issues du sommet qui leur correspond.

ne part aucune diagonale (donc d'un zéro dans la formule) et l'augmentation d'une unité du nombre des diagonales issues des deux autres sommets de ce triangle. La figure 9 montre les trois triangulations possibles de l'hexagone, duales des trois tectoèdres d'ordre six.

La triangulation des polygones est un problème classique de géométrie combinatoire : on sait calculer le nombre des triangulations possibles d'un polygone. Le problème de dénombrement des tectoèdres est donc résolu. Voici la formule qui donne ce nombre en fonction de n :

$$(2n-5)!/n!(n-3)!+3(n-3)!/2(n/2)!((n-4)/2)! + (n-3)!/2((n-1)/2)!((n-3)/2)! + ((2n-6)/2)!/3(n/3)!((n-3)/3)!$$

Dans cette formule, $n!$ (qui se lit «factorielle n ») représente le produit des n premiers nombres entiers. De surcroît, on convient de remplacer par zéro tout terme contenant une factorielle portant sur des nombres non entiers. On retrouve alors les valeurs précédemment calculées sur ordinateur. Ce nombre augmente très vite avec n : pour n égal à 20, il est supérieur à dix millions.

En faisant des tas de sable, nous avons été amenés à étudier de curieux polyèdres, et aussi à découvrir une classification insolite des polygones convexes. Les tas de sable nous réservent-ils d'autres surprises ?

Roger Iss est ancien professeur de mathématiques spéciales du Lycée Kléber, à Strasbourg.

Roger ISS, *Considérations sur une famille de polyèdres*, in *L'Ouvert* (publication de l'Association des professeurs de mathématiques d'Alsace et de l'IREM de Strasbourg), n° 51, juin 1988.

Roger ISS, *Des tas de sable aux graphes*, in *L'Ouvert*, n° 56, septembre 1989.

Roger ISS, *Les tectoèdres*, Bulletin de l'Association des professeurs de mathématiques de l'enseignement public, n° 402, mars 1996.

Le briquet pneumatique

PAUL BOUTIÉ • IOANNIS MANOS

Un principe de physique simple pour allumer un feu.

Pour allumer un feu, on doit apporter de l'énergie. Si la friction du bois et la percussion de la pierre sont des méthodes bien connues, le procédé fondé sur l'échauffement de l'air par compression est, au contraire, resté à l'état de curiosité. Évoqué en quelques lignes dans les traités d'ethnologie et connu dans les laboratoires de physique au début du XIX^e siècle, le

briquet pneumatique aurait connu un grand succès si, pendant la première moitié du XIX^e siècle, l'invention des allumettes n'était venue le faire sombrer dans un oubli presque complet.

Le briquet pneumatique utilise un principe physique connu de tous ceux qui ont déjà gonflé un pneu de bicyclette : lorsque l'on comprime un gaz, on le chauffe. Si l'on place à l'intérieur du

volume chauffé une substance dont la température d'inflammation est inférieure à la température obtenue, elle s'embrase. En pratique, on réalise le briquet à l'aide d'un cylindre et d'un piston afin de former une sorte de petite pompe à vélo dépourvue de sortie d'air.

En Europe, la découverte de ce principe remonte au début du XIX^e siècle, simultanément en France et en Angleterre. Un brevet fut pris en 1807, mais le succès des allume-feu fut... un feu de paille, en raison semble-t-il de leur manque de fiabilité.

En Asie du Sud-Est, des briquets fondés sur le même principe sont signalés jusque vers 1950 dans plusieurs régions, réparties entre la Birmanie, l'ancienne Indochine et l'Indonésie. Le début de leur utilisation est antérieur à 1865, date du plus ancien témoignage écrit. Comme déjà, à cette époque, l'objet est très répandu, on pense qu'il y a eu au moins deux foyers d'apparition, l'un en Europe, l'autre en Asie. Pour cette région, le principe aurait pu être découvert accidentellement en Indonésie, au



Mode d'emploi

1. Prélever un petit brin d'amadou, très aéré, le placer dans la cavité à la base du piston, sans le tasser.
2. Enduire légèrement de graisse le joint en fil de soie.
3. Tenir le cylindre fermement dans une main et poser sa base en appui sur une table ou sur le sol.
4. Introduire partiellement le piston dans le cylindre (sur environ deux centimètres).
5. Frapper sur la poignée avec le plat de la main (la base du piston doit entrer en contact avec le fond du cylindre) et, dans le même geste rapide, attraper la poignée pour ressortir le piston. Souffler sur la petite braise.

CONSEILS

- Ne pas trop graisser le joint, car de la graisse risque de se déposer au fond du tube et l'amadou devient inutilisable. Après quelques échecs, il faut changer l'amadou.
- La descente du piston doit être rapide : donner un coup sec sur la poignée.
- La remontée doit également être rapide ; sinon, la braise n'a pas assez d'oxygène et s'éteint.
- Après plusieurs usages, la couche supérieure du joint se délite. Il faut la reconstituer en refaisant quelques tours de fil sur le joint usé. Regraisser légèrement.

sein de groupes utilisant le soufflet pour des activités techniques telles que le travail du métal.

BAMBOU ET BRICOLAGE

Vous pourrez fabriquer un briquet pneumatique en ne recourant qu'à des matériaux naturels et faciles à trouver. À l'image de certains objets asiatiques, prélevez le tube sur une tige de bambou. De diamètre presque constant, le creux naturel de cette plante offre des parois lisses et solides ; le nœud cloisonnant entre deux segments, utilisé comme base du cylindre, résiste bien à la pression. À défaut de bambou, et toujours d'après des modèles ethnologiques, un cylindre en corne ou en bois dur et homogène peut être creusé à l'aide d'un vilebrequin ou d'une perceuse électrique. Les parois de la cavité, naturelle ou aménagée, doivent être lissées durant quelques minutes avec une feuille de papier de verre enroulée sur elle-même ou autour d'un support rigide.

Selon nos expérimentations, un cylindre en bambou ou en buis présentant en moyenne une cavité de neuf millimètres de diamètre et profonde de huit centimètres convient bien. Les objets ethnologiques semblent légèrement plus petits que les nôtres.

L'autre pièce du dispositif, le piston, sert à comprimer l'air dans le cylindre. Sa longueur et son diamètre seront adaptés aux dimensions de la perforation. Les objets expérimentaux qui fonctionnent le mieux sont en buis, de section parfaitement circulaire, d'un diamètre inférieur d'environ un millimètre à celui de la perforation. Afin de manipuler facilement le piston, la tige est aménagée en poignée à l'une de ses extrémités.

Pour assurer une parfaite étanchéité, l'extrémité est munie d'un fil de soie ou de coton enroulé plusieurs fois, comme sur une bobine. De cette manière, le piston s'ajuste à la perforation du cylindre. Ce joint n'est efficace que s'il est enduit de cire ou d'une substance grasseuse comme le saindoux. Ces matières suffisent à faire tenir le fil sans nœud ni colle.

Pour trouver le réglage parfait, on ajoutera ou on enlèvera du fil et de la graisse jusqu'à ce que le piston entre et sorte sans difficulté du cylindre, mais que l'on sente, en l'enfonçant, une légère résistance due à la compression de l'air. Le réglage est bon lorsque le piston, une fois relâché, remonte de lui-même de quelques millimètres.

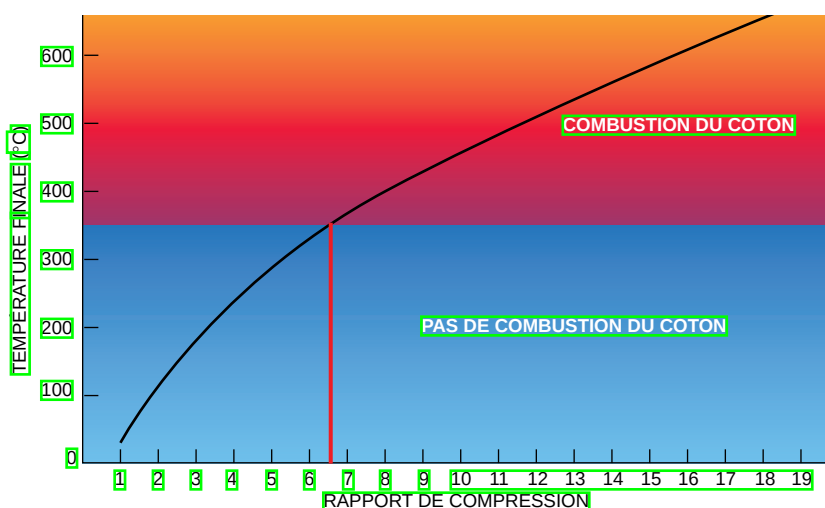
Comment transformer la chaleur produite en flamme, ou plutôt, dans un premier temps, en braise ? À cet effet, on creuse sur la base du piston, avec la

Air chauffé et combustion d'amadou

A l'aide des lois de la thermodynamique, on calcule la température atteinte lors de la compression. La rapidité de la compression permet de considérer celle-ci comme adiabatique : aucun échange de chaleur n'a lieu entre l'extérieur et l'intérieur du tube. Dans ce cas, le produit de la température en kelvins par le volume à la puissance 0,4 est une constante (le coefficient 1,4 est le rapport des chaleurs spécifiques de l'air à pression constante et à volume constant). Ainsi, si la température ini-

tiale est de 20 °C (293 kelvins), on calcule la température finale en fonction du rapport de compression.

Lorsque le rapport de compression est égal à cinq, l'air comprimé atteint 284 °C ; si l'on comprime l'air plus de 6,7 fois, la température dépasse 350 °C, la température de combustion du coton (ou de l'amadou qui est proche). En pratique, la qualité de l'étanchéité limite le rapport de compression que l'on peut atteindre et donc, la température finale.



pointe d'un couteau ou d'un ciseau à bois, une petite cavité profonde de trois à quatre millimètres. Elle servira à accueillir une substance facilement inflammable, qui se trouvera ainsi propulsée à la base du cylindre.

Les substances inflammables appropriées sont les mêmes que celles qui sont utilisées pour récupérer les étincelles produites par la méthode de percussion pierre contre pierre ou pierre contre métal. La solution la plus simple consiste à prélever un petit brin sur une mèche de briquet dit « à amadou » (vendue au mètre dans certaines drogueries). L'amadou véritable, tiré du champignon connu sous le nom d'amadouvier à feu (*Fomes fomentarius*) doit, avant usage, être traité selon les recettes traditionnelles, dont plusieurs variantes sont recensées dans le monde. Nous avons obtenu de bons résultats avec celle qui consiste à tremper le champignon pendant une quinzaine de jours dans la sève contenue dans le creux naturel de certains platanes. On peut également carboniser partiellement l'amadou ou du coton hydrophile (qui est bien aéré), dans une boîte métallique fermée et perforée de quelques trous.

Une fois la cavité située à la base du piston bourrée de matière combustible, le briquet à air comprimé est prêt à fonctionner. D'un geste énergique, enfonçons le piston dans le tube, puis retirons-le aussitôt. Le brin d'amadou, ou son succédané, est devenu incandescent. Il suffit de le sortir avec précaution, de le placer dans une touffe d'herbes sèches et de souffler pour obtenir la flamme.

Paul BOUTIÉ et Ioannis MANOS travaillent au Laboratoire de préhistoire de l'Université Paul Valéry de Montpellier.

Henry BALFOUR, *The Fire Piston*, Smithsonian Report for 1907, Washington Printing Office, pp. 565-593, planches I-V, 1908.

George MONTANDON, *Traité d'ethnologie cyclo-culturelle et d'ergologie systématique*, éditions Payot, Bibliothèque scientifique, 1934.

Jacques COLLINA-GIRARD, *Feu par percussion, feu par friction, les données de l'expérimentation*, in *Bulletin de la Société préhistorique française*, tome 90, fasc. 2, pp. 159-173, 1993.

Mathématiques

Calcul scientifique

Lionel Sainsaulieu. Éditions Masson.

Introduction au calcul scientifique

Brigitte Lucquin et Olivier Pironneau. Éditions Masson.

Considérons un problème de nature industrielle : de l'eau se trouve dans un réservoir, serpente dans divers tuyaux, reçoit ou cède de la chaleur, sort par un robinet. Pour prévoir sa température à la sortie, les ingénieurs doivent : (1) écrire toutes les équations qui régissent l'ensemble des phénomènes : c'est la modélisation ; (2) concevoir une méthode de résolution approchée de ces équations (car en général les équations sont beaucoup trop compliquées pour être résolues de manière exacte) ; (3) écrire un programme d'ordinateur qui réalisera cette résolution approchée (beaucoup trop longue et compliquée pour être faite à la main) ; (4) comparer les résultats que donne la machine à ceux que fournit l'expérience : c'est la validation. Ainsi le calcul peut prédire une température de 30 °C quand le thermomètre indique 50 °C : la modélisation est-elle mal faite ? La résolution numérique est-elle défectueuse ? Y a-t-il une erreur dans la programmation de l'ordinateur ? De toute façon, il faut tout recommencer.

Il y a dix ans, la deuxième étape, la résolution approchée du problème une fois qu'il est modélisé, était nommée «analyse numérique» ; elle s'appelle aujourd'hui «calcul scientifique». Le contenu n'a pas changé, mais l'emphase linguistique révèle l'accroissement en importance de la communauté académique qui se préoccupe du sujet. Cet accroissement ne reflète en rien un besoin du marché (qui s'évoque bien davantage sur les trois autres points), mais simplement le mode de recrutement des universitaires, fait sous le principe de la «cooptation» (le terme recouvre des pratiques variées, allant de la constitution de chapelles au népotisme).

Comme le dit avec beaucoup de modestie L. Sainsaulieu, auteur du premier ouvrage dont nous rendons compte, il s'agit de réunir «les principales méthodes employées pour la résolution numérique des problèmes de l'ingénieur».

Le modèle mathématique, une fois décrit, se traduit par une ou plusieurs

«équations aux dérivées partielles». On recherche en général une fonction inconnue, par exemple (dans le cas évoqué) une température. Cette température T dépend du temps t , et aussi de l'endroit où on la mesure. C'est donc une fonction inconnue $T(t, x, y, z)$. Les renseignements que l'on a à son propos sont généralement écrits au moyen des dérivées de T par rapport aux diverses variables. Par exemple, s'il n'y a qu'une seule variable d'espace x (cas d'un barreau infiniment fin), l'«équation de la chaleur» donnera la température de la barre à l'instant t et au point d'abscisse x : le problème sera entièrement résolu, aussi bien dans le temps que dans l'espace, si on sait résoudre l'équation.

Comment fait-on pour écrire les équations, c'est-à-dire pour modéliser le phénomène ? La réponse est plaisante : on fait de son mieux ! On essaie, tant bien que mal, d'écrire les lois de la physique : équations de Maxwell, de Boltzmann, de Navier-Stokes, etc. La physique regorge de lois, mais ces lois sont à la fois empiriques et approximatives. Au laboratoire Système de perception de l'ETCA (Arcueil), David Ruelle a récemment fait un exposé dont nous reprenons les termes :

«Les lois de la physique macroscopique (conduction, rayonnement, etc.) ne résultent pas d'une intégration des lois de la physique microscopique (attractions-répulsions entre électrons, protons, etc.) : la mécanique statistique est à l'heure actuelle incapable de déduire les lois macroscopiques des lois microscopiques, sauf dans le cas particulier (très rare et sans intérêt industriel) des situations en équilibre. Les lois empiriques usuelles ne sont que des approximations : si, par exemple, on écrit $F = mg$, on néglige des termes en g^2 , g^3 , etc. On ne sait pas quel est le domaine de validité de ces approximations. Sont-elles encore valables pour des milieux très chauds, sous forte pression, très raréfiés, etc. ?»

Dans son chapitre V, «Modélisation numérique d'un problème de thermique», L. Sainsaulieu décrit un exemple en apparence très simple : de l'eau séjourne dans un réservoir, puis passe par un unique tuyau rectiligne, avant de sortir par un robinet. La question est : quelle est la température de l'eau à la sortie ? Même dans ce cas très simple, on ne sait pas modéliser correctement le problème ; il faut faire des hypothèses quant à la nature des écoulements (turbulences, etc.) et, ultérieurement, l'expérimentation validera ou non ces hypothèses. Cela fait, on peut mettre en œuvre les méthodes numériques que l'auteur a exposées au préalable, et l'on obtient... des résultats décevants ! Ce chapitre est absolument

remarquable ; le lecteur y découvre le vrai problème de la connaissance scientifique, qui est celui-ci : nous n'avons qu'une vision partielle, simplifiée, insuffisante des phénomènes et, même avec ces simplifications, nous ne parvenons pas à faire des prédictions. L'auteur est ingénieur de recherche chez Renault, et sa présentation sera une découverte – mieux, une révélation ! – pour les étudiants qui n'ont, jusque-là, été exposés qu'au savoir dogmatique et figé que l'Université délivre (et où le second ouvrage saura les replonger, que le lecteur se rassure !).

Quelles sont donc les méthodes numériques dont dispose l'ingénieur ? Il en existe principalement deux : la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis. La première consiste à remplacer une dérivée $f'(x)$ par une «différence» $f(x) - f(y)/x - y$. Si on travaille sur un intervalle, par exemple x compris entre 0 et 1, on «discrétise» l'intervalle en introduisant une subdivision $x_0 = 0, x_1, \dots, x_N = 1$, et on remplace $f'(x)$ par $f(x_k) - f(x_{k-1})/x_k - x_{k-1}$. Les nombres inconnus $f(x_k)$ apparaissent alors comme la solution d'un gros système linéaire : on doit résoudre $AX = B$, où A est une matrice inversible, B un vecteur donné.

La seconde méthode – celle des éléments finis – fait appel à une approximation de la fonction inconnue par des fonctions plus complexes, telles des fonctions triangles, mais se ramène finalement aussi à un système linéaire. La méthode des «différences finies» étant conceptuellement plus simple que la méthode des «éléments finis», L. Sainsaulieu choisit très judicieusement de les exposer dans cet ordre, alors que, on ne sait pourquoi, B. Lucquin et O. Pironneau adoptent l'ordre inverse. Quant à la résolution des systèmes linéaires, qui remonte essentiellement à Carl Friedrich Gauss, les diverses méthodes sont extrêmement bien exposées par L. Sainsaulieu, avec leurs avantages et leurs inconvénients. On a enfin un bref aperçu sur une troisième catégorie de méthodes, les méthodes spectrales, utilisées surtout pour les problèmes de vibrations.

Le livre de L. Sainsaulieu est clair, bien écrit et attrayant. Je ne lui ferai qu'un reproche : je ne crois pas qu'il soit adapté au public que l'auteur mentionne – issu du premier cycle universitaire – outre la transformation de Fourier, à laquelle l'auteur fait référence à plusieurs reprises (niveau maîtrise), la méthode des éléments finis requiert en effet une bonne connaissance de la théorie des distributions (niveau maîtrise et souvent DEA). L'auteur sait-il que, par la grâce de réformes successives, les étudiants sortant du premier cycle savent à peine ce qu'est un espace vectoriel ?

Médecine

Le prix du bien-être

Édouard Zarifian. Éditions Odile Jacob, 1996.

Je n'aurai pas une opinion aussi favorable du livre de B. Lucquin et O. Pironneau (Université Paris 6), dont la présentation me paraît à la fois dogmatique et confuse. Sur un plan conceptuel, on n'y retrouve nulle part les interrogations quant à la validité des méthodes que L. Sainsaulieu mentionne. Sur le plan pédagogique, la présentation laisse à désirer. Par exemple, page 37, un lemme énonce l'inégalité de Poincaré, avec cette démonstration : «En dimension 1, débrouillez-vous ; en dimension 2, allez voir dans Dautray-Lions» ! De manière générale, les difficultés conceptuelles sont passées sous silence. Certes, dans un livre d'analyse numérique, l'auteur n'a pas à détailler les difficultés conceptuelles, mais il doit au moins en mentionner l'existence ; c'est du reste ce que fait L. Sainsaulieu.

Je ferai deux reproches supplémentaires au livre de B. Lucquin et O. Pironneau.

D'une part, je ne vois pas ce qu'apportent les programmes d'ordinateur détaillés qui apparaissent à la fin de chaque chapitre. Présenter l'algorithme est suffisant. Un programme dépend de l'environnement informatique (type d'appareil, etc.) et, de toute façon, il est presque impossible de recopier un listing sans faute (il aurait fallu joindre une disquette).

D'autre part, un dernier chapitre traite de la programmation des ordinateurs parallèles ; il ne comporte heureusement que quelques pages, car les auteurs sont manifestement peu au fait des véritables difficultés que comporte ce type de programmation (ce sont les communications entre processeurs qui sont les plus pénalisantes).

Après ce bref tour d'horizon des deux ouvrages, revenons à notre ingénieur qui doit résoudre un problème et doit passer par toutes les étapes décrites au début de cet article. La modélisation, nous l'avons dit, constitue le premier problème majeur – L. Sainsaulieu donne bien d'autres exemples (aile d'avion, moteur diesel, etc.) où elle est difficile. Lorsqu'elle a été réalisée et lorsque les programmes numériques ont fait leur travail, le second problème majeur que l'on rencontre est celui du logiciel ou, plus exactement, de la validation du logiciel : comment être sûr qu'un programme informatique, composé de dizaines, voire de centaines de milliers de lignes, fait bien ce qu'il est supposé faire ? La mésaventure d'Ariane V a montré que les inquiétudes à cet égard n'étaient pas inutiles, et, comme le dit très justement Maurice Nivat, il s'agit d'un problème à propos duquel on ne dispose d'aucun outil conceptuel.

Bernard BEAUZAMY

A l'heure où les pouvoirs publics ne semblent pas savoir comment concilier économie et soins efficaces, le livre d'Édouard Zarifian vient nous proposer une analyse des mécanismes de la prescription massive des psychotropes. Ces médicaments qui modifient le comportement psychique permettent, par exemple, de calmer l'anxiété, de faire dormir en cas d'insomnie ou de soigner un syndrome dépressif.

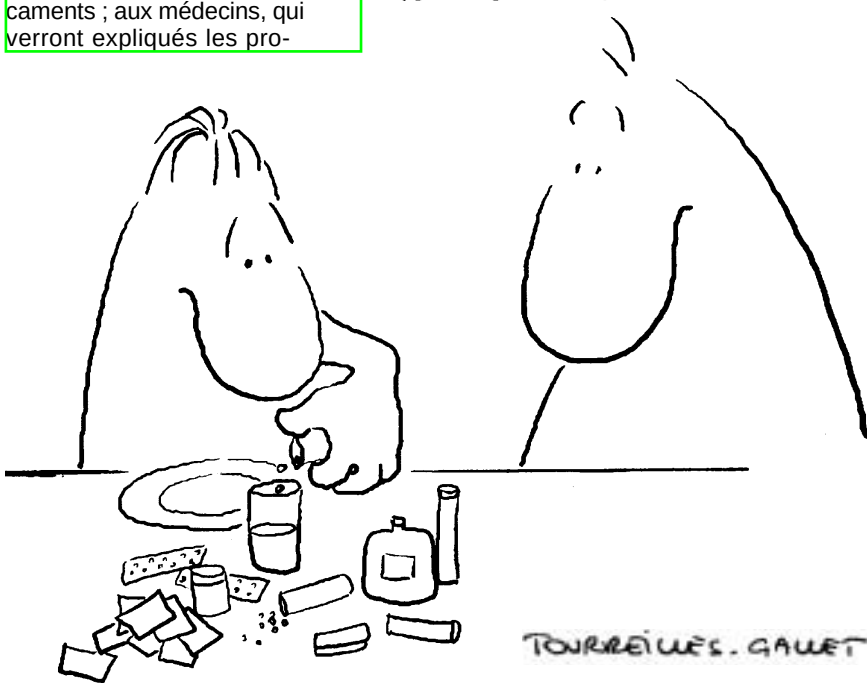
Ce livre présente au public un rapport technique demandé à É. Zarifian il y a deux ans par Simone Weil, alors ministre des Affaires sociales. Celle-ci voulait connaître les raisons de la consommation excessive de psychotropes par les Français (en moyenne, trois fois supérieure à celle de leurs voisins européens). Remis au gouvernement actuel en avril 1996, ce rapport ne fut présenté qu'aux journalistes, mais Odile Jacob a persuadé son auteur de s'expliquer dans un livre : ses recherches sur les rouages de la chaîne qui mène du producteur au consommateur de psychotrope révèlent comment fonctionne la santé en France.

Ce livre s'adresse surtout à trois types de personnes : aux consommateurs, qui comprendront qu'ils doivent être plus circonspects dans leur utilisation des médicaments ; aux médecins, qui verront expliqués les pro-

blèmes posés par la fiabilité des tests thérapeutiques ou par la pharmacovigilance fondée sur leur seule bonne volonté ; aux hommes politiques, censés représenter nos aspirations, qui pourront s'interroger sur les problèmes éthiques que pose l'observation d'une consommation supérieure de psychotropes chez les RMistes et les chômeurs, par exemple.

É. Zarifian explique simplement les paradoxes d'un système de santé où s'opposent intérêts commerciaux et intérêts de santé publique, et il veut faire réfléchir à la question : «Un médicament est-il un bien de consommation comme un autre ?» Assurément le premier interpellé est le médecin prescripteur, qui observe quotidiennement l'insuffisance de sa formation face aux troubles psychologiques : il a du mal à délimiter ce qui est pathologique de ce qui ne l'est pas, à préciser quand l'usage du psychotrope est indispensable et, surtout, à assurer une relation médecin-malade à valeur thérapeutique. Il est alors soulagé quand les visiteurs médicaux lui apportent des informations sur l'emploi des médicaments susceptibles d'aider efficacement ses patients. Simultanément il comprend qu'il est alors considéré par les laboratoires comme une cible de propagande publicitaire, et non comme un agent de santé publique. Cela, parce que le laboratoire s'est vu fixer le prix de ses médicaments par l'État à un niveau bas qui le contraint

**N'OUBLIE PAS DE PRENDRE
TON REPAS AU MILIEU DE
TES MÉDICAMENTS**

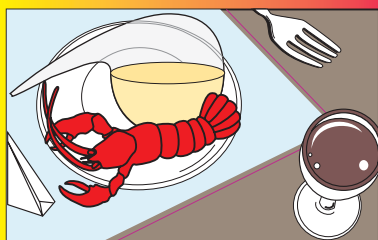


FRANCE INFO et POUR LA SCIENCE

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 24 mars 1997.

FRANCE

info

à augmenter le volume de ses ventes : la logique économique s'oppose à la rigueur médicale.

Pour contrer une information partielle, le médecin peut se tourner vers des revues médicales, mais la plupart lui sont envoyées gratuitement, en raison des soutiens publicitaires. La liberté du choix des articles publiés ne peut être garantie. S'il se rend en Formation médicale continue ou dans des colloques, les autorités qui interviennent ont un rôle difficile, étant, en raison même de leur compétence, experts officiels auprès des organismes de santé publique et consultants des firmes pharmaceutiques. Ces liens quasi obligés entre la recherche et l'industrie sont encouragés par l'État, qui se dégage de plus en plus de ses obligations financières. Le médecin est alors perplexe...

Le consommateur potentiel de psychotropes sera questionné différemment par ce livre : pourquoi préfère-t-il souvent avaler un médicament en cas de tristesse due à des difficultés socioprofessionnelles ou sentimentales ? Le médecin et son psychotrope sont-ils le recours le plus facile et le moins onéreux pour supporter les difficultés ? Notre société favorise l'illusion qu'on peut toujours combler les manques ; les médicaments jouent ce rôle. Car le concept de santé semble avoir glissé de la notion d'absence de maladie à celle, bien plus vaste, d'état de bien-être et, pourquoi pas, de bonheur ! Le psychotrope correspondrait à l'idéal social d'un bonheur consommable (et remboursé).

Toutefois, si l'on décide que, finalement, la santé est le bien-être, il reste à savoir si ce bien-être est une appréciation personnelle ou s'il obéit à une définition collective, puisque pris en charge par la collectivité. Affirmer alors que « l'homme possède en lui-même les ressources pour accéder seul au bien-être est subversif, car cela entrave le commerce, contrarie le désir de toute-puissance de la science et rend l'homme indépendant de tout pouvoir politique en restaurant sa dignité d'homme libre ».

Le politique, lui, comprendra à la lecture de ce livre que le psychotrope est pris dans une logique de consommation et de rentabilité, aggravée par le paradoxe d'un système de soins pris en tenaille entre dirigisme et libéralisme. Dirigisme d'une Sécurité sociale qui détermine le prix le plus bas possible du médicament qu'elle remboursera ; libéralisme d'une prescription sur laquelle les laboratoires jouent d'un poids d'autant plus grand que l'État leur laisse le champ libre sur des points aussi sensibles que la formation et l'information des médecins.

Le politique voudra-t-il libérer l'information de ses contraintes commerciales en finançant lui-même les expérimentations sur les psychotropes ? Voudra-t-il subventionner la Formation médicale continue et les revues médicales, afin qu'elles ne recourent plus à l'aide des laboratoires ? Peut-il imposer l'évolution de la formation des médecins, d'une pratique dite objective, associant à chaque symptôme un médicament, vers un exercice plus artistique de la consultation, qui n'aboutirait plus systématiquement à une prescription médicamenteuse ?

Insistons : ce livre ne remet pas en cause l'utilité des psychotropes, mais leur utilisation. L'auteur lui-même les a étudiés et les prescrit en cas de besoin, mais il estime que sa responsabilité d'acteur de la santé mentale impose qu'il dénonce les mécanismes pervers qui aboutissent à une situation de mauvaise santé mentale dont nous ne devons être ni dupes ni complices. Ses propositions seront examinées par le nouvel Observatoire national de la prescription médicamenteuse, qu'il réclamait. Il resterait à promouvoir une réorganisation de la structure des soins, non plus centrée sur la maladie, mais sur le malade. Vaste programme que les psychiatres ont adopté depuis longtemps, et qui répartirait de façon plus efficace les sommes considérables drainées par l'industrie de la santé.

Elisabeth HOFFMANN
et Elisabeth BACON

Astronomie

Longitude. L'histoire vraie d'un génie solitaire qui résolut la plus grande énigme scientifique de son temps

Dava Sobel, Éditions J.-C. Lattès,
(196 pages, 89 F).

La création de l'Observatoire de Paris en 1667, puis de celui de Greenwich huit ans plus tard, sont motivées par des raisons économiques : les puissances maritimes veulent explorer les nouveaux mondes et, à cette fin, envoyer leur flotte sur les mers océanes. On savait alors parfaitement déterminer la latitude, mais la science du ciel résoudrait-elle le difficile problème de la



Le chronomètre de marine (H-4) de John Harrison.

détermination de la longitude en mer ? On pense d'abord que l'étude des mouvements des satellites galiléens permettra, par l'observation de Jupiter, une « lecture » de l'heure et un réglage des horloges à pendule, garde-temps peu fiables à bord des navires ; mais Jupiter n'est pas toujours visible, et la méthode n'est réellement utilisable qu'à terre (il en résultera toutefois, en 1676, la découverte importante de Oläus Römer : la lumière se propage à vitesse finie).

Aussi, en 1714, le Parlement anglais lance un concours : le Conseil des longitudes (*Board of longitudes*) attribuera une récompense de 20 000 livres (100 kilogrammes d'or fin !) à quiconque obtiendra une précision de un demi-degré sur la longitude après 40 jours de navigation (la durée moyenne d'un trajet aux Antilles). La solution peut provenir de l'astronomie ou de la technique horlogère.

Edmond Halley pense que l'étude du mouvement « rapide » de la Lune améliorera les tables empiriques, afin de calculer à l'avance pour un lieu donné (Paris ou Greenwich), et, d'heure en heure, la distance angulaire de la Lune à des étoiles brillantes. En mer, la mesure de ces distances à l'aide de l'octant (puis du sextant) de John Hadley (1731), par comparaison avec des tables de distances lunaires, fournira la différence de temps local entre le bateau et l'observatoire de référence, c'est-à-dire la longitude du navire.

Rigoureuse en théorie, cette méthode ne donnait pas de bons résultats, car les tables de la Lune n'étaient pas assez précises. Pendant la première moitié du XVIII^e siècle, les travaux successifs de Halley, de Pierre Charles Le Monnier, de Leonhard Euler, de Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande,

de Nicolas Louis La Caille améliorent peu à peu ces tables. Celles de Tobias Mayer (1754), bien qu'empiriques, offrent une précision remarquable : moins de 30 secondes de degré sur la position calculée de la Lune.

Ces nouvelles tables permettent à l'astronome Nevil Maskelyne (qui dirige l'Observatoire de Greenwich) d'éditer en 1766 le *Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris*, pour les besoins de la navigation comme l'indique le titre. Cependant, il fallait près de quatre heures pour effectuer les longs calculs afin de déterminer la longitude à partir des observations. Voilà pour la solution d'origine astronomique.

La solution technique aura bien du mal à rivaliser, car le Conseil britannique des longitudes comprend beaucoup d'astronomes, d'autant que Newton avait estimé que les horloges ne pourraient pas réussir dans ce projet.

Toutefois, John Harrison (1693-1776), autodidacte tenace, va inventer et mettre au point patiemment (de 1730 à 1760) le chronomètre de marine. Plusieurs améliorations conduisent à l'horloge baptisée H-4, qui ressemble à une grosse montre de gousset de 13 centimètres de diamètre. Lors de l'essai en mer, en 1762, ce chef-d'œuvre n'aura perdu que cinq secondes en 81 jours ! Cook emportera une copie fidèle de cet instrument lors de son deuxième voyage autour du monde (1772-1775). Dès 1765, Maskelyne avait fait attribuer 3 000 livres à la veuve de Mayer (décédé en 1762), en récompense de ses tables et de sa contribution à la résolution du problème de la longitude. Malgré l'opposition de Maskelyne, Harrison ne recevra qu'en... 1773 la totalité du prix : 20 000 livres. Toutefois le coût très élevé de ces chronomètres en retardera l'usage courant en mer : la méthode des distances lunaires ne sera abandonnée que vers 1900.

Dava Sobel, journaliste scientifique, raconte, sans la romancer, cette histoire qui rassemble astronomes, marins et horlogers du XVIII^e siècle. C'est bien écrit et agréable à lire, malgré de rares fautes de traduction. Une relecture par un astronome français n'aurait pas été superflue. Je regrette également l'absence d'un index, d'autant plus que l'édition originale (1995) en comporte un. Il n'empêche que ce bon livre peut faire connaître John Harrison, cet ingénieur méconnu en France, qui remporta non sans mal le fabuleux prix du Conseil britannique des longitudes ; grâce à ses travaux, la cartographie des océans a été grandement améliorée.

Michel TOULMONDE



Le magazine scientifique d'ARTE

AU MOIS D'AVRIL :

Mardi 1^{er} avril à 20 h :

La première photographie.

Les lunettes renversées.

Le paradoxe

de la tartine beurrée.

L'affaire Sokal.

Les cafards

Mardi 8 avril à 20 h :

Thèmes non communiqués

Mardi 15 avril à 20 h :

Thèmes non communiqués

Mardi 22 avril à 20 h :

La bilharziose.

Sons et forme des tambours.

La réaction de Maillard.

La communication

des sciences.

Les sociétés de chimpanzés.

Mardi 29 avril à 20 h :

La vitesse.

Les pigments des peintres.

Les brisures de symétrie.

La reproductibilité

des expériences.

La bilharziose combattue.

36 15 ARTE (1,29 F/mn)

<http://www.arte-tv.com>

arte

Zoologie

Toutes les tortues du monde

Frank Bonin, Bernard Devaux et Alain Dupré. Éditions Delachaux et Niestlé, 1996.

Le livre de Frank Bonin, Bernard Devaux et Alain Dupré, *Toutes les tortues du monde*, n'est pas un livre sur l'élevage de ces animaux, comme on en trouve facilement au rayon «animaux» de toutes les librairies. C'est le premier ouvrage général en langue française sur la biologie, la classification, l'écologie et la protection des tortues.

Les tortues sont des reptiles dont le corps est protégé par une carapace osseuse, et aussi les seuls vertébrés dont les ceintures pectorale et pelvienne sont à l'intérieur de la cage thoracique. La carapace de la tortue est composée de deux couches : une couche interne osseuse et une couche externe cornée ; chez certaines formes, la couche externe est remplacée par une peau fine ou un «manteau» de cuir. Les parties dorsale et ventrale de la carapace sont reliées soit par une structure osseuse, soit par un ligament, pour former une boîte solide protégeant l'animal. Chez la plupart des tortues, la tête, le cou, la queue, ainsi que les quatre membres peuvent être rétractés à l'intérieur de la carapace.

La tortue n'est pas seulement un animal «en boîte» ; c'est aussi un symbole de longévité : presque toutes les tortues vivent plus d'un demi-siècle, et certaines franchissent allégrement les 100 ans. Les tortues constituent un groupe varié : la plus petite tortue ne mesure pas plus de dix centimètres et ne pèse que 80 grammes, tandis que la

plus grande atteint deux mètres de long et pèse près d'une tonne. Se cacher dans sa «boîte» n'est pas le seul moyen de défense chez les tortues : certaines possèdent une ou deux charnières sur la carapace pour la fermer entièrement, d'autres sont capables de s'aplatir comme une crêpe pour se faufiler dans les crevasses rocheuses ; certaines peuvent se défendre avec leurs redoutables mâchoires tranchantes, d'autres encore, toujours en cas de danger, dégagent une odeur désagréable pour chasser l'ennemi. La plupart des tortues vivent dans l'eau douce, certaines sont entièrement terrestres, d'autres marines. Leur régime alimentaire est varié : certaines sont herbivores, d'autres sont omnivores ou entièrement carnivores.

Près de 260 espèces de tortues sont représentées dans ce bel ouvrage. Par ordre systématique, chaque espèce est présentée, avec sa répartition géographique précise, accompagnée d'une carte, les caractéristiques qui permettent de l'identifier, son mode de vie : son milieu, son comportement, son régime alimentaire et sa reproduction, et les mesures de protection qui la concernent. La classification, le milieu où vit l'animal, ainsi que les noms en français, en anglais et, parfois, le nom local sont indiqués dans les marges pour faciliter la lecture, avec de nombreux jolis dessins et photographies.

Le problème de la protection des tortues, sujet que les auteurs connaissent particulièrement bien, est largement traité dans ce livre (publié en collaboration avec le WWF). Les deux tiers des espèces de tortues sont menacées ou en voie de disparition ; ces reptiles lents et inoffensifs sont victimes de diverses activités humaines : de la pollution, de l'urbanisation, du ramassage pour la consommation ou pour la collection. Aujourd'hui, en France, toutes les espèces de tortues sont protégées.

Il est un peu dommage que la partie sur la biologie générale des tortues soit légère et que la classification des reptiles utilisée soit pour le moins archaïque (il est étonnant, en cette fin du xx^e siècle, de lire, comme au début du xix^e siècle, que les lézards et les crocodiles sont rassemblés dans un ordre des sauriens). Enfin, certaines indications anatomiques sont erronées ; par exemple, le cou des tortues est formé de huit vertèbres cervicales, non pas de sept. Ce livre n'en est pas moins agréable à lire et pratique à utiliser. Il comble un vide dans la littérature herpétologique de langue française.

Haiyan TONG



Geochelone radiata, l'une des plus belles tortues menacée à Madagascar.

SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06

POUR LA SCIENCE Directeur : Philippe Boulanger. Rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef), Hervé This (Rédacteur en chef adjoint), Françoise Cinotti (Rédactrice - Secrétaire générale de la rédaction), Bénédicte Leclercq, Luc Allemand, Yann Esnault, Philippe Pajot. Secrétariat de Rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Direction Marketing et Publicité : Henri Gibelin, assisté de Séverine Merviel. Direction financière : Pierre Lecomte. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Delphine Savin. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Paloma Cabeza-Orcel, Frédéric Debelle, Bettina Debù, Marie-Thérèse Landousy, Olivier Le Fèvre, Daniel Le Rudulier, Guy Mahouy, Jean-Claude Martzloff, Anne Masé, Didier Massonnet, Claude Olivier, Pierre Pfeiffer, Jean-Pol Tassin.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor : John Rennie. Board of editors : Michelle Press, Timothy Beardsley, Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, John Horgan, Kristin Leutwyler, Philip Morrison, Madhusree Mukerjee, Sacha Nemecek, Corey Powell, Ricki Rusting, David Schneider, Gary Stix, Paul Wallich, Philip Yam, Glenn Zorpette. Publisher : John Moeling. Chairman and Chief Executive Officer : John Hanley. Corporate Officers : John Moeling, Robert Biewen, Anthony Degutus.

PUBLICITE France
Chef de Publicité : Susan Mackie, assistée de Anne-Claire Ternois, 8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. (1) 46 34 21 42.
Télex : LIBELIN 202978F.
Télécopieur : 43 25 18 29

Étranger : John Moeling, 415 Madison Avenue, New York. N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP
Henri Gibelin.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE
Canada : Modulo - 233, avenue Dunbar Mont-Royal, Québec, H3P 2H2 Canada
Suisse : GM Diffusion - Rue d'Etraz, 2 - CH 1027 Lonay
Autres pays : Éditions Belin - B.P. 205, 75264 Paris Cedex 06.

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

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.»

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris).

Nos lecteurs trouveront, en pages 18A, 18B, 98A et 98B, des bulletins d'abonnement.