



Pour la Science

POUR LA SCIENCE

Juin 2000

édition française de
SCIENTIFIC
AMERICAN

www.pourlascience.com

*Un moyen
de transport
pour...
après-demain?*



La téléportation

BLOC-NOTES

de Didier Noin

TRIBUNE DE LECTEURS

JEU-CONCOURS

Molécules nouvelles

par Pierre Tougne

POINT DE VUE

Médecine et sciences

par François Grémy



PRÉSENCE DE L'HISTOIRE

Un concept d'éternité entre foi et science

par François Xavier Fatah



SCIENCE ET GASTRONOMIE

Le goût de l'aliment

par Hervé Th...



PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

■ Réchauffement climatique et pollutions

■ Un dino à sang chaud ■ Franchissement de stop

■ Plat comme l'Univers ■ La matière noire dans tous ses états

■ Histoire en pièces ■ Thérapie génique : premiers succès

■ Une photo sensible ■ Une nouvelle méthode de mesure



VISIONS MATHÉMATIQUES

Simplex avés

par Ian Stewart



IDÉES DE PHYSIQUE

La montée de la sève

par Roland Lenoble



L'IMAGE DU MOIS

par Denis Michel et Éric Le Cam



ANALYSES DE LIVRES

■ Histoire solaire et climatique, d'Elisabeth Nesme-...

Libes et Gérard Thuillier

■ Ce qu'il reste à découvrir, de John Maddox (traduction de C. Cantoni-Fort)

■ La Chymie charitable et facile en faveur des Dames, de Marie Meurdrac

■ Food Chemistry, de H.D. Melitz et W. Grosch

Deux encarts d'abonnement entre les pages 18 et 19, un encart broché service lecteurs et une carte d'abonnement entre les pages 98 et 99. Les abonnés reçoivent un encart abonnement Génies de la Science et carte...



Chaque mois, retrouvez le sommaire complet de la revue **en ligne** avec pour chaque article une bibliographie et un complément d'information.

www.pourlascience.com

Logique et calculs de la téléportation

par Jean-Paul Delahaye

Une idée de science-fiction confrontée à la réalité : limites et raison en matière de téléportation

La téléportation quantique

par Anton Zeilinger

La possibilité de transporter instantanément un objet d'un endroit à un autre, rêvée par la science-fiction, est aujourd'hui réalité... au moins pour les particules lumineuses.

L'alimentation des prédateurs marins

par Yves Cherel, Christophe Schmet et Henri Weimerskirch

Adaptés à des conditions extrêmes, les oiseaux et les mammifères marins parcourent des milliers de kilomètres à la recherche de nourriture

La découverte des naines brunes 52

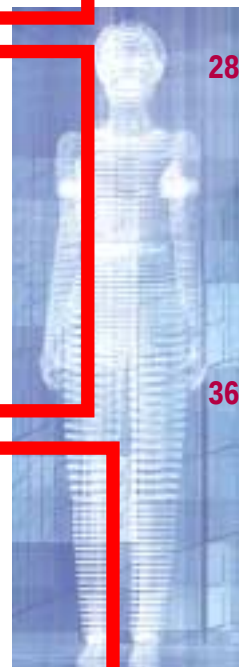
par Gibor Basri

Moins massives que les étoiles, mais plus massives que les planètes, les naines brunes semblaient être des objets astronomiques rares. De nouveaux recensements indiquent que ces objets sont peut-être aussi répandus que les étoiles.

Les lapsus

par Mario Rossi et Évelyne Peter-Defare

L'étude de la fréquence et de la nature des lapsus révèle que ces erreurs de langage ne sont pas produites de façon aléatoire.



Ces si délicats instruments de verre

68

par Jean-Claude Chapuis

Les verres que l'on fait vibrer ont un son spécifique, «cristallin», qui a plus de nombreux compositeurs.

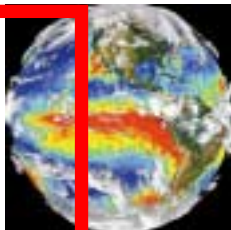


La surveillance du climat

76

par Michael King et David Kerridge

Un satellite qui embarque cinq groupes de capteurs collecte les données nécessaires à la prévision des évolutions climatiques.



Le kayak aïeoutien

82

par George Dyson

Le kayak des Aïeoutes était adapté à la vie de ces chasseurs de pleine mer. Aujourd'hui, les kayakistes s'interrogent encore sur les principes de sa conception raffinée.

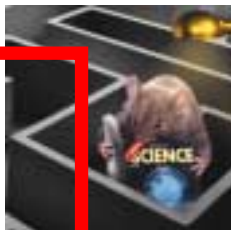


Une souris intelligente

90

par Joe Tsien

En fabriquant des souris plus «intelligentes», les généticiens découvrent quelques-uns des mécanismes moléculaires de l'apprentissage et de la mémoire.



Les essais cliniques

100

par Justin Zivin

Peu de principes acuis franchissent toutes les étapes qui séparent le laboratoire, où ils sont synthétisés, de la pharmacie, où ils figurent dans des médicaments commercialisés.



La téléportation

Jules Verne, pourtant grand visionnaire, n'y avait pas pensé. Dommage : nous avons plaisir à imaginer comment les cuivres rutilants d'un instrument de téléportation «mécanique» auraient permis au Capitaine Némó d'envoyer à travers le monde ses zélés serviteurs, vêtus de leur robuste veste de tweed épais... avec la petite martingale qui leur barrait les reins. Publiée dans l'édition Hetzel du *Chancellor*, un roman aujourd'hui bien oublié de Jules Verne, l'illustration ci-dessous aurait évoqué le transport par faisceau lumineux : *Beam me up*, Capitaine Némó.

Wolfgang Pauli, physicien peu indulgent pour ses contemporains, stigmatisait les théories médiocres en affirmant qu'elles n'étaient pas assez folles pour être vraies. Il aurait apprécié, car peu banales, les expériences et les possibilités rêvées de la téléportation quantique, domaine où l'incompréhensible quantique (parce que non familier) permet l'inconcevable (parce qu'apparemment immatériel).

Si l'imagination des scientifiques pour tirer parti des possibilités naturelles est mal connue du public, si les procédures cérébrales amenant ces fulgurantes sont entièrement ignorées, il est encore plus étonnant que la science dépasse la fiction. On informait le grand mathématicien (il n'en est pas de petits) David Hilbert qu'un de ses étudiants avait abandonné les mathématiques pour l'inoésie. Hilbert ricana «qu'il se doutait que le pauvre garçon n'avait pas assez d'imagination pour être mathématicien».

Les lecteurs intéressés par ces intrépides délires rationnels liront les deux articles sur le sujet, *Logique et calcul de la téléportation*, et *La téléportation quantique*, pages 28 à 44.

Philippe BOULANGER





BLOG-NOTES

Didier NORDON

La tête (translucide) de l'art

Un bon romancier est capable de faire prendre pour réel ce qu'il a imaginé. Comme on dit, il « donne vie » aux personnages et aux lieux qu'il peint. Or l'exigence exactement contraire à celle-ci est également inhérente à son travail : il doit savoir donner toutes les apparences de l'imaginaire à ce qu'il a puisé dans la réalité. Le lecteur de *Madame Bovary*, par exemple, ne perçoit plus le fait divers dont ce roman est issu, oubliant le rapport entre fiction et réalité, une œuvre forte rend aussi difficile de deviner la part de fiction que de deviner la part de fiction contenue dans la réalité.

Faire passer l'imagination créatrice pour la demande avant d'imagination créatrice que de faire passer pour vrai ce qui est inventé. Il y a là un grand mystère. Est-ce un mystère de l'art, ou de la réalité?

Un clone triste

Naguère, un article naissait de la mise en interaction par un éditeur de deux ingrédients : du papier, un auteur. Le premier ingrédient était essentiel, le second était... secondaire. Si l'éditeur ne payait pas le papier, il n'avait pas de papier, donc pas d'article. S'il ne payait pas l'auteur, il avait quand même, en général, l'article. Sur le bon de souscription de la revue *travers champs*, on lit cet aveu émouvant et sincère : « Si nous le pouvions, nous préférierions payer les auteurs plutôt que le papier et l'impression. » Cette revue nous mène en bateau. N'a-t-elle jamais entendu parler du progrès ? Si elle publiait en ligne, elle économiserait le prix du papier et pourrait consacrer l'argent ainsi gagné à payer ses auteurs.

Le progrès tend à rendre superflu le papier. Or, nous l'avons vu, l'auteur joue un rôle encore moins important dans la confection d'un article. Donc il doit attendre à rejoindre sous peu le papier au cimetière des archaïsmes... Est-ce pensable ? Mais oui, bien sûr : il va être remplacé par son clone ! Un

va de soi : comment le clone peut-il proposer d'argent ? Des clones de lecteurs lisant sur écran des articles écrits par des clones d'auteurs... Voilà la solution aux problèmes économiques des revues.

Météorites et ovnis

Des pierres tombant du ciel ? Pareille chose est-elle croyable ? Jusqu'au XVII^e siècle, la réponse était, sans hésitation, oui. Ce genre d'événement faisait partie des prodiges auxquels on croyait, comme on croyait aux jeux de la nature ou aux manifestations du surnaturel. Depuis la fin du XVIII^e siècle, la réponse est de nouveau oui. Et entre ces dates ? Entre les deux, il y a eu le développement de l'esprit scientifique.



Dans un petit livre vivant et agréable à lire, *Ces pierres qui tombent du ciel* (Le Pommier, 1999), Jean-Paul Poirier raconte la naissance, au XVIII^e siècle, du scepticisme. Les savants ne croyaient plus aux prodiges et se méfiaient des témoignages des paysans. Mais ce scepticisme a vite disparu. La concordance des témoignages et les résultats des analyses chimiques des pierres ont convaincu les savants que les témoignages n'étaient pas des racontars. Restait à trouver une explication. Comme le dit joliment un auteur de 1812 : « Il est long et difficile de faire croire les faits les plus certains, lorsqu'ils nous paraissent inexplicables. » Désormais, les météorites – puisque c'est d'elles qu'il s'agit – sont à la fois certains et explicables.

Une légende, que J.-P. Poirier réfute, veut que les savants du XVIII^e siècle aient fait preuve d'un scepticisme excessif à l'égard des météorites. Cette légende permet à certains auteurs actuels de fustiger le scepticisme systématique des scientifiques, comme une espèce de maladie constitutive qui les

empêche, aujourd'hui, de prendre en compte deux phénomènes : la foudre en boule et les ovnis. Pour leur rareté, leur caractère extraordinaire et la difficulté de les observer, ces phénomènes rappellent les météorites. Contrairement aux météorites, toutefois, la foudre en boule ne laisse aucune trace matérielle qu'on puisse analyser.

Les témoignages assez nombreux pour la considérer comme un phénomène réel. J.-P. Poirier souligne l'absence de témoignages qui les conduisent à conclure qu'ils n'ont bien fait de renoncer rapidement à leur scepticisme vis-à-vis des météorites, ceux du XX^e ont bien fait de maintenir le leur vis-à-vis des ovnis.

Le fait apporté des bonbons...

Si vous surprenez une conversation dans laquelle viennent les mots « sexy » et « bonbon », vous imaginerez, sans doute, quelque situation scabreuse avec mineures détournées grâce à des sucreries, ou autres vilénies. Hé bien, votre effort d'imagination serait très insuffisant. Ce qu'il faut imaginer est infiniment plus inattendu : une conversation mathématique.

Oui, « sexy » (en anglais : *sexy*) et bonbon (en américain : *candy*) ont fait leur entrée en mathématiques. Les « nombres premiers sexy » sont les couples de nombres premiers dont la différence est égale à 6 ; par exemple, 5 et 11, 83 et 89, 101 et 107. L'étymologie de « sexy » est évidente : en anglais, *six* et *sex* se prononcent presque de la même façon. Mais ce fin jeu de mots ne se traduit pas en français. À mon avis, les mathématiciens français auraient dû conserver leur purisme langagier habituel. Eux qui ont fait de louables efforts pour éviter les termes anglo-saxons, ils n'auraient pas dû conserver l'expression « nombres premiers sexy », mais recourant à une formulation bien connue des traducteurs, donner la définition suivante : lorsque la différence entre deux nombres premiers est égale à 6, on dit qu'ils font un jeu de mots intraduisible en français.

Quant aux bonbons, ils ont peu de valeur scientifique, mais sont agréables au goût. Le mathématicien Paulo Ribenboim recourt donc à ce terme pour désigner des propositions établissant des conséquences plaisantes, mais faciles, d'une conjecture non encore démontrée : « si elle ou telle difficile conjecture était vraie, alors on aurait tel ou tel joli résultat ». Pareil résultat, rigolo mais sans grande valeur en soi, Paulo Ribenboim l'appelle un bonbon. À quand la suite ? Charlotte ?



TRIBUNE DES LECTEURS

L'apport arabe

J'ai lu avec beaucoup d'intérêt l'article «Quelle distance sont les étoiles?» d'Ulrich Bastian (voir *Pour la Science*, avril 2000) dans la rubrique *Présence de l'histoire*. J'ai cependant été choqué par le fait que l'auteur ne mentionne dans son récit historique que l'apport des civilisations grecque et occidentale en laissant entendre que seules ces deux civilisations ont contribué dans le domaine de l'astronomie.

L'apport des autres civilisations est aussi fondamental et plus particulièrement celui de la civilisation arabo-musulmane qui a été un trait d'union entre les grecs et les occidentaux. Il suffit de constater qu'une grande partie des noms de constellations et d'étoiles sont d'origine arabe et que les tables de Tycho Brahe sont inspirées de mesures arabes.

Pour les mesures des distances des étoiles, les arabes ont été certainement outillés par la force des choses et les spécialistes pour ont certainement en dire plus, je peux cependant vous traduire un extrait que j'ai trouvé dans un livre du philosophe Algazel : «Lorsqu'on observe une étoile dans le ciel, on a l'impression qu'elle est très petite, mais les calculs des astronomes montrent qu'elle a des dimensions supérieures à celles de la Terre».

L'exemple de l'article d'Ulrich Bastian n'est pas singulier, j'ai souvent remarqué que lorsqu'on veut raconter un peu d'histoire dans un domaine scientifique, on commence souvent par citer Archimède, Hippocrate, Platon ou Euclide, puis on passe directement à Galilée, Newton, Leibniz ou Huygens! Je crois que c'est une vue très étroite qui ne rend pas compte des choses : la civilisation et le progrès scientifique appartiennent à toute l'humanité.

Les babyloniens ont transmis leurs connaissances aux égyptiens, qui l'ont à leur tour transmis aux grecs, puis les arabes ont capté leurs connaissances et les ont transmises aux chinois et des chinois pour le transmettre aux occidentaux qui ont appris aussi des choses des civilisations américaines, etc.

Hassan DOUZI, Agadir (Maroc)

Autisme à l'envers

J'ai lu avec grand intérêt votre article concernant «Les origines de l'autisme» (voir *Pour la Science*, avril 2000), et je me permets de vous faire quelques observations. Je travaille dans le domaine de l'enseignement spécialisé avec des enfants de tout âge atteints de pathologies diverses, de type autistique, ainsi que des troubles du comportement et de la personnalité.

Parmi ces enfants se trouvent des enfants atteints du syndrome de Williams, syndrome rare dont on dit parfois qu'il est un «autisme à l'envers» car ces enfants présentent une forme d'hypercommunication qui les font aller vers des personnes inconnues et leur adresse la parole sous forme de questions stéréotypées. Ce syndrome est dû à une délétion sur le chromosome 7, avant que la fécondation ait lieu.

On voit donc des enfants qui semblent maîtriser tout parfaitement le langage, cependant nous avons fait l'observation que ces enfants ont très peu d'intérêt pour la musique, ce qui est en fait l'aspect sémantique. Nous avons réalisé cette étude pour l'obtention du diplôme d'écologie avec l'équipe de Boris Cyrulnik à l'Université de Toulon. En fait, ces enfants manifestent des dons particuliers pour la musique et le rythme, et ont (tous?) l'oreille absolue».

On ne peut donc pas dire que la parenté génétique est probable entre ces deux syndromes car vous mettez en lumière, dans votre article, la complémentarité entre le chromosome 7. La corrélation entre ces deux affections, ainsi que l'influence génétique sur le comportement, sont des informations complémentaires sur l'autisme, ainsi que sur le syndrome de Williams.

Françoise BONVIN, Blonay (Suisse)

Euthanasie d'exception

Médecin pratiquant les soins palliatifs et membre de l'association «Jusqu'à la mort, accompagner la vie», je suis à 95 pour cent d'accord avec l'article de Robert Zittoun (voir *Pour la Science*, avril 2000). Toutefois, je pense qu'il ne faut pas repousser totalement l'idée d'une euthanasie d'exception.

Pour illustrer mon avis, je propose l'exemple de la loi sur le don d'organes. Elle ne remet pas en question le principe fondamental de l'interdiction de l'homicide, mais elle reconnaît que, dans certaines circonstances, la stricte application des principes est impossible, et que, dans ce cas, il faut choisir le moindre mal, ici, la mort de l'agresseur plutôt que celle de la victime. Il s'agit d'un problème de pragmatisme (application des principes à un cas réel) et non de principes.

Pour mieux approcher le cas de l'euthanasie, on peut imaginer un résistant qui tuerait un de ses camarades pour lui éviter les tortures et la mise à mort qui lui seront, à coup sûr, infligées par la police politique. Il y a alors un «cas de force majeure», qui fait apparaître l'homicide comme un moindre mal dans une problématique entièrement pragmatique. Remarquons que ce principe

est précisément celui qui est retenu par la justice néerlandaise pour tolérer l'euthanasie. Toutefois, je pense que l'application de ce principe impose les restrictions suivantes, qui s'éloignent du modèle néerlandais.

Premièrement, le cas de force majeure doit être réellement «majeur», et ne sera donc que très rarement invoqué. L'analyse des témoignages publiés dans la presse situe environ cette fréquence à moins de 10 cas dans toute l'Europe occidentale, et au maximum, même s'il travaille dans des spécialités où le décès est fréquent.

Je pense qu'il ne peut s'agir que de la perspective attendue de douleurs ou de souffrances intolérables que la thérapie ne pourrait vraisemblablement pas soulager et que le malade ne veut pas subir. Remarquons que cela ne s'applique donc pas, *a priori*, à un patient dans le coma.

Deuxièmement, le principe même de pragmatisme impose de choisir, parmi plusieurs voies, celles qui imposent à la société la moins de violence. Or, au-delà de la décision d'euthanasie, la pratique même de cette décision peut avoir un degré variable de violence symbolique. Ainsi, le choix de certains produits et techniques purement «mortifères» (employés parfois en euthanasie vétérinaire) est certainement à rejeter au profit de médicaments et de modes d'administration où la violence morale est réduite.

De façon générale, l'abstention thérapeutique ou l'accentuation de l'analgésie thérapeutique sont souvent qualifiées d'euthanasie passive, même si elles peuvent dans une certaine mesure être associées au décès, sont préférables aux méthodes «actives», lourdes de violence symbolique pour les parents et pour les soignants.

Enfin, il ne s'agit pas d'une loi majeure sur l'euthanasie, mais simplement de l'inscription de l'exception d'euthanasie compassionnelle à un autre voisin de celui de la légitime défense. Il n'y aurait donc pas «d'autorisation préalable», mais possibilité pour le juge d'instruction, s'il est saisi, de prononcer son non lieu au vu du dossier médical, même lorsque l'homicide est matériellement prouvé.

Pascal MILLET, Montbéliard

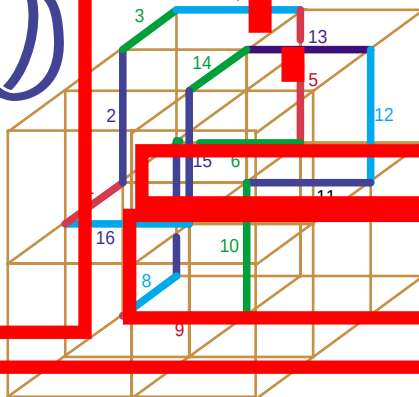
Écrivez à *Pour la Science* vos questions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pouirlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pouirlascience.com.

JEU-CONCOURS N° 72

PIERRE TOUGNE

Molécules nouées

Les polymères sont des macromolécules formées par la répétition d'un même motif appelé monomère. Imaginons que ces monomères sont représentés par les segments d'un réseau cubique et que les liaisons peuvent se faire dans les quatre directions de l'espace ; cherchons alors le minimum de monomères pour construire un polymère noué (au sens mathématique c'est-à-dire qu'il se referme sur lui-même) ou un polymère entrelacé. Pour le nœud trivial (une boucle), c'est évidemment 4 monomères, de même pour l'entrelacs le plus simple (deux boucles entrelacées) il faut déjà 16 monomères. Dès que l'on passe à des nœuds ou entrelacs plus compliqués, cela devient vite inextricable. L'objet du concours de ce mois-ci est de trouver le nombre minimum de monomères sur un réseau cubique pour former un nœud de trefoil. La démonstration que c'est effectivement un minimum n'est pas demandée ; en revanche, un beau dessin est souhaité.



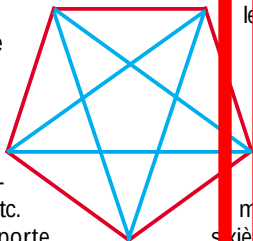
à 16 monomères sur réseau cubique

Envoyez vos réponses aux questions à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06. Parmi les réponses exactes reçues en juin 2000, dix gagnants recevront un livre.

REPONSE AU JEU-CONCOURS N° 70

L'ordre lexicographique étant « moins familier » que l'ordre des nombres entiers, raisonnons sur les entiers de 1 à 26, ce qui est équivalent. Montrons qu'avec les entiers de 1 à 25 on peut construire une suite de ces nombres, de telle sorte que les sous-suites croissantes ou décroissantes que l'on peut extraire comportent au plus cinq nombres : 21, 22, 23, 24, 25, 16, 17, 18, 19, 20, 11, 12, 13, 14, 15, 6, 7, 8, 9, 10, 1, 2, 3, 4, 5.

Le déplacement de n'importe quel nombre créera nécessairement une sous-suite croissante ou décroissante de 6 nombres : par exemple si l'on déplace 8 entre 24 et 25, on fera apparaître la sous-suite croissante 8, 11, 12, 13, 14, 15 etc. Ajoutons le nombre 26 à n'importe quel rang : il y aura toujours une sous-suite de 6 nombres croissants ou décroissants et cela quel que soit le réarrangement de cette suite que l'on peut imaginer pour supprimer cette sous-suite, car on fera apparaître toujours une sous-suite de 6 nombres parmi les nombres de 1 à 25 d'après la remarque précédente. Ce résultat est un cas particulier du théorème d'Erdős et Skewes qui énonce que de toute suite de $mn + 1$ entiers positifs distincts, on peut extraire une sous-suite décroissante de longueur au moins $m + 1$ ou on peut extraire une sous-suite croissante de longueur au moins $n + 1$.



Dans le deuxième problème j'ai omis dans son énoncé la formule «deux à deux», *mea culpa*. Il aurait fallu lire : soit trois nombres ayant un diviseur commun deux à deux, soit trois nombres soit premiers entre eux deux à deux. En voici néanmoins une solution. Représentons les nombres par les sommets d'un polygone régulier et colorons les segments joignant deux sommets quelconques en bleu si les deux nombres sont premiers entre eux et en rouge dans le cas contraire. Quel est le plus petit nombre de sommets du polygone régulier pour être certain qu'il y aura un triangle rouge ou bleu ? Le pentagone montre que cinq sommets sont insuffisants. Ajoutons un sixième sommet, de ce sommet partons cinq segments vers les cinq autres sommets dont trois au moins seront de la même couleur. Si celle-ci est rouge, on formera un triangle rouge avec une arête du pentagone, si elle est bleue, on formera un triangle bleu avec une diagonale donc la propriété énoncée est incompatible avec six nombres quelconques. Ce nombre s'appelle nombre de Ramsey (voir *Pour la Science*, n° 155, septembre 1990) noté $R_2(3) = 6$. Pour quatre nombres entiers (soit un quadrilatère monochrome), le résultat est $R_2(4) = 18$, mais la démonstration est beaucoup plus compliquée. Enfin $R_2(5)$ n'est pas connu, on sait seulement qu'il est entre 43 et 49.

VIDE
2000

6 - 7 - 8 Juin

Alpe
Grenoble

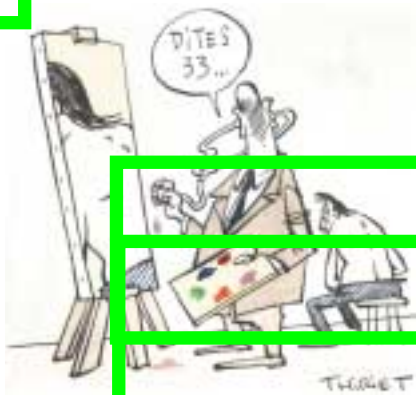
2^{ème} Salon
des Professionnels
du Vide

Exposition
Conférences
Formation

Vide Industriel
Vide Scientifique
Microélectronique
Nanotechnologies

- Tél 01 53 01 90 30 -
- Fax 01 42 78 63 20 -
<http://www.vide.org>

CEPS - Société Française du
Vide



Médecine et sciences

FRANÇOIS GRÉMY

La médecine doit être scientifique, mais elle doit aussi rester un art.

La conformité des actes médicaux aux données les plus récentes de la science est évidemment nécessaire à des soins de qualité, mais est-elle suffisante ? Question importante quand de nombreux médecins hospitaliers sont aussi des chercheurs qui travaillent en recherche clinique ou, même, «à la pailasse». Quels problèmes épistémologiques et éthiques pose cette double activité ? Les intéressés en ont-ils conscience ? La réflexion se fonde sur une question plus fondamentale : quelle est la finalité de la médecine ?

Cette dernière est une discipline d'action : le médecin assiste des personnes, vise un épanouissement maximal de l'individu assailli par la maladie. Il ne se satisfait pas de donner des soins techniques, même de la meilleure qualité possible ; il veut aussi prendre globalement soin de la personne du malade.

Toutefois la médecine, devenue «biomédecine» et adepte des techniques dures (résonance magnétique nucléaire, thérapie génique...) entretient une relation ambiguë avec la science et les techniques. C'est pourquoi les extraordinaires progrès des connaissances et des techniques médicales du ^{xx}e siècle ont entraîné de si nombreux succès de la médecine au cours des dernières décennies. À bon droit, la médecine se proclame «scientifique». Les conséquences pour la formation initiale et continue des médecins sont considérables. Ont-elles été suffisamment tirées ?

Premier paradoxe : l'apprentissage des sciences fondamentales effectué en faculté de médecine n'est pas toujours une bonne initiation à la science. L'accumulation des faits à mémoriser, à réciter, encombre l'esprit sans beaucoup le former. Quand on montre plus les résultats que la démarche et que l'on fait passer la mémorisation avant la réflexion, on ne forme pas bien les étudiants à l'utilisation concrète des connaissances scientifiques.

Médiocrement scientifique, la formation médicale est néanmoins marquée

par le «scientisme» : la Science (avec un grand S) est la seule source valide de connaissances ; parmi les sciences (avec un petit s), seules les sciences médicales doivent être véritablement respectées. L'étudiant est élevé dans l'exaltation de la toute puissance des connaissances scientifiques et techniques, d'où un désenchantement vis-à-vis de la clinique, trop sujette à l'approximation et à la subjectivité. On lui apprend à se comporter en chercheur en ingénieur ou en technicien, en ingénieur, pas en médecin.

Le chercheur et le praticien exercent leurs talents dans deux univers mentaux différents : le chercheur a pour objectif la connaissance à valeur universelle ; le praticien doit résoudre des problèmes locaux, propres à chaque malade. Le premier a pour ennemi essentiel l'incertitude, et il peut prendre son temps pour l'éliminer ; il veut le probable pour faux, jusqu'à prouver le contraire. Le second doit décider et agir, dans un temps toujours court et dans l'incertitude, qu'il doit bien sûr minimiser ; il doit accepter de fonder ses décisions sur le probable. Descartes recommande de faire la distinction entre la recherche de la vérité et la nécessité d'action quotidienne ; face à l'incertitude, l'un et l'autre n'impliquent pas le même comportement.

Le chercheur bâtit la science, le praticien n'utilise les résultats et en emprunte, autant qu'il peut, les méthodes (formalisation de la décision, méthode hypothético-déductive). Le chercheur imagine, calcule et construit le monde artificiel de son expérience, qu'il cherche à isoler de son contexte ; le praticien vit dans le monde réel, toujours complexe, même s'il essaye d'y ajuster les modèles qu'il a reçus de la science médicale. Le chercheur se valorise en se spécialisant ; le praticien, tout en connaissant très bien son domaine d'activité, ne peut et ne doit pas méconnaître le contexte de son intervention, c'est-à-dire l'unité du corps, et l'unité de la personne, de son malade. En médecine, le véritable professionna-

lisme n'est pas confond pas avec la spécialisation. Le cas d'un hyper-spécialiste peut prouver l'exception.

La formation médicale actuelle ne produit pas assez de «équipes d'équipes», capables de diriger une équipe de spécialistes.

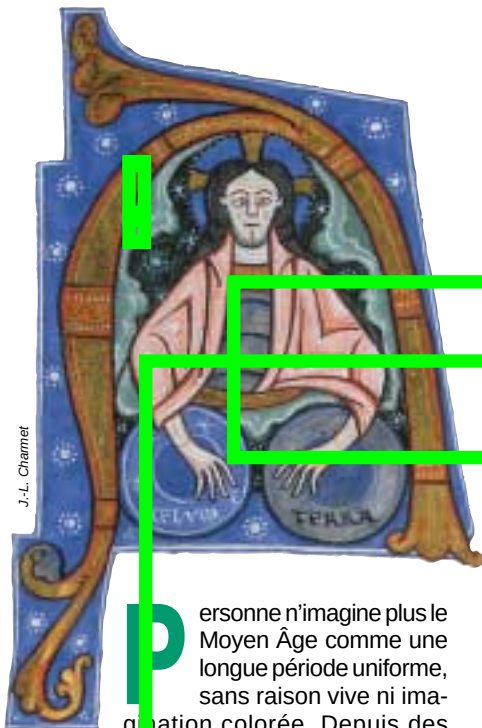
Au total, la médecine n'est pas une science. C'est une pratique.

La question de la formation médicale, comme celle des conditions d'exercice de la médecine, revient finalement à la suivante : quels soins et quels médecins voulons-nous pour demain ? Si la médecine est vraiment une prise en charge de la personne dont la santé et l'intégrité physique sont menacées, ne doit-on pas initier les jeunes médecins aux causes et conséquences de la maladie (les unes et les autres le plus souvent psychologiques, sociales et professionnelles), ainsi qu'à l'éthique de la profession ?

Peut-on également omettre de signaler aux jeunes médecins qu'ils participent au maintien, à la préservation et à la restauration de la santé de la population, qui reste l'objectif majeur de toute politique de santé, que la médecine n'est qu'un moyen au service de cette cause, et que la profession doit renoncer à une conception trop sacerdotale de son rôle ? Autrement dit, les médecins n'ont plus le droit de rester ignorants des problématiques de santé publique.

La nécessaire réforme des études médicales, initiales ou continues, pose un dernier problème : l'enseignement est conçu et mis en œuvre par ces spécialistes pointus que sont les professeurs de médecine. Tels qu'ils sont formés et recrutés (je suis l'un d'eux), ils ne sont pas les mieux placés pour concevoir et animer une formation qui corresponde aux besoins que j'ai tenté d'identifier ici.

François GRÉMY est professeur honoraire de la Faculté de médecine de Montpellier-Nîmes.



J.-L. Charnet

Un concept d'éternité entre foi et science

FRANÇOIS-XAVIER PUTALLAZ

En 1277, le débat fait rage : le monde est-il éternel ou a-t-il été créé par Dieu ? Théologiens et scientifiques s'affrontent. Des philosophes tentent de concilier les exigences rationnelles et celles de la foi.

Personne n'imaginerait plus le Moyen Âge comme une longue période uniforme, sans raison vive ni imagination colorée. Depuis des décennies, les historiens de la pensée ont appris à y traquer la « diversité rebelle », celle des tensions et des contradictions, celle des débats aussi que l'université naissante avait inventés. D'où les grandes « disputes », ces exercices scolaires périlleux qui témoignent que la mise en question des plus hautes vérités donne à l'esprit de mesurer progressivement la profondeur. À cet égard, la question de l'éternité du monde est paradigmatique : elle révèle l'arôme contrasté du Moyen Âge.

Tout a commencé le 19 mars 1255. Ce jour-là, à la rue du Fouarre, la Faculté des arts de l'Université de Paris décide d'inscrire à son programme obligatoire l'ensemble des œuvres connues d'Aristote : les professeurs doivent les commenter, les étudiants se familiariser avec cette pensée païenne qu'on avait redoutée durant plus de 50 années. C'en est fait des interdictions et mises en garde : la philosophie aristotélicienne et son appareil scientifique ont désormais conquis leur droit de cité.

C'est alors que surgissent les difficultés. Le théologien d'origine italienne Bonaventure témoigne de cette époque où, encore étudiant, il entend dire qu'Aristote pense que le monde est éternel. Lorsqu'il découvre les preuves et arguments qu'on y apporte, il s'interroge : comment se peut-il que quelqu'un nie avec tant d'aplomb que le monde ait eu un commencement, à l'encontre des mots les plus explicites du début de la Genèse ?

Dix ans plus tard, on a lu Aristote et on l'a commenté : aucune hésitation n'est plus possible ; le philosophe grec soutenait bel et bien l'éternité du monde, et l'on ne parvient plus à réfuter ses arguments. Bref, la raison humaine

conclut inexorablement d'une façon qui semble contredire la foi chrétienne.

Quelques années plus tard, le 7 mars 1277, l'évêque de Paris s'engage à son tour dans le débat et dresse une liste de quelque 219 thèses que certains maîtres soutiennent dans leurs cours, des philosophes bien peu respectueux des limites de la foi. Les dégâts semblent irréparables : voilà des maîtres disant que la raison conduit nécessairement à des conclusions que la foi oblige à nier. L'évêque condamne ces philosophes et soutient qu'ils transgressent les limites de leur compétence philosophique et qu'ils débattent d'erreurs aussi évidentes qu'exécrables ; pour couronner le tout, il tonne l'évêque, prétendant qu'on ne peut rationnellement répondre aux auteurs païens, ces dangereux personnages finissent par dire que ce qui est vrai selon la philosophie ne l'est pas pour la foi : « Ils font, dès lors, comme s'il y avait deux vérités contraires. »

Pour tous les professeurs et étudiants qui poseraient les allégations condamnées par l'évêque, pour ceux même qui les entendraient sans en dénoncer sur-le-champ leurs auteurs, une sanction : l'excommunication et la destitution. En défendant la foi chrétienne de cette manière brutale, l'évêque de Paris tranchait en fait dans un débat difficile et délicat qui engage la question du lien harmonieux entre la foi, la raison et le savoir.

Cette mesure de l'Église aura de graves conséquences pour l'Université. Certains philosophes acceptent de se taire et une autocensure se met en place qui éteint les polémiques sur le thème de la création. D'autres désertent la Faculté de Paris pour aller enseigner dans d'autres capitales, où l'autorité est moins coercitive. La condamnation de l'évêque de Paris, qui sera maintenue durant des siècles, a vraisemblablement eu pour effet de ralentir les progrès de la science dans les universités françaises.

LA FOI, MAÎTRESSE DE LA RAISON

Au cours des années 1255-1277, s'élaborent des positions incompatibles, qui allaient s'affronter sans détour. La première est celle de Bonaventure qui, dans ses sermons parisiens de 1267, s'en prend explicitement aux philosophes de la Faculté des arts ; il réfute les fausses conceptions de ces maîtres qui exposent dans leurs cours les arguments prétendument irréfutables d'Aristote en faveur de l'éternité du monde, même s'ils finissent par ajouter que la vérité se trouve du côté de la foi. Selon Bonaventure, ils ont une grave responsabilité, celle d'étaler aux yeux de tous des arguments en faveur de cette erreur, puis de les laisser sans réfutation. C'est donner libre cours aux doutes contre la foi. Selon Bonaventure, non seulement la foi atteste que le monde a eu un commencement, mais toute création *ex nihilo* suppose un début : la production « à partir de rien » signifie que l'être vient du non-être, que le monde nécessairement a été produit à un moment donné. Il soutient qu'Aristote s'est trompé et qu'il faut trouver des arguments pour le réfuter. Pour lui, la raison, fondée sur les principes de la foi, et la science, qui doit rester sous le contrôle strict de la foi, stipulent l'impossibilité d'un monde éternel.

À la veille de la grande condamnation de 1277, plusieurs théologiens défendent ce même point de vue qui pose que la raison ne doit pas s'opposer à la foi, mais agir dans le même sens. Il faut dire absolument que, du fait même qu'elle est créée, une créature que Dieu a produite volontairement à partir de rien ne saurait être éternelle, car cela serait contradictoire. En effet, en posant qu'une créature n'a pas de commencement, on admet, d'une part, que son être ne lui a pas été donné par un autre à partir du non-être et, d'autre part, que Dieu lui a donné un être

à partir du non-être, puisqu'elle a été créée. La contradiction est patente.

POUR L'AUTONOMIE DE LA RAISON

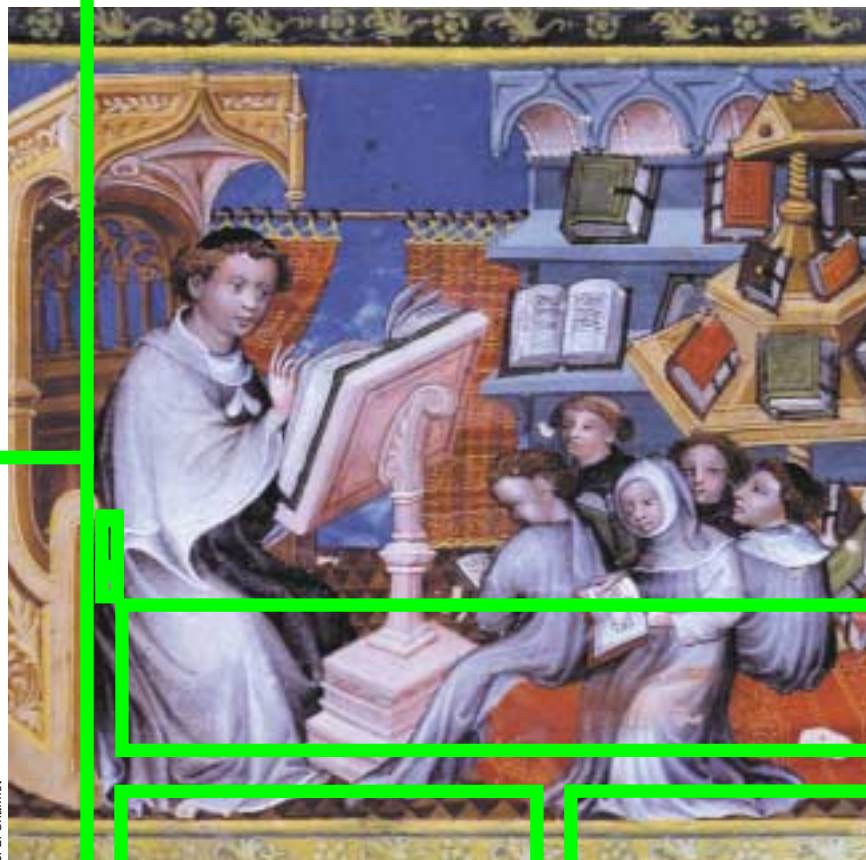
Pour patenter qu'elle soit, elle n'est pas du tout apparue contradictoire pourtant à un esprit aussi avisé que Thomas d'Aquin qui revendique une autonomie de la raison : c'est à la deuxième position philosophique annoncée. Selon Thomas d'Aquin, il n'y a aucune impossibilité logique à tenir que le monde fut à la fois créé et éternel. En effet, «être créé» ne veut pas dire «avoir un commencement»; «être créé» veut dire «dépendre d'un autre dans son être». Dieu aurait pu créer un monde éternel, tout comme il a pu le créer avec un commencement temporel. Commencement ou éternité ne sont pas des catégories impliquant la notion de création. En fin de compte, il n'y a aucun antagonisme entre les découvertes scientifiques, les vérités philosophiques et les exigences de la foi.

Seulement Thomas d'Aquin pensait que la raison, assurée du fait de la création, restait incapable par elle-même de connaître avec sûreté les modalités du début du monde : à ses yeux, les arguments rationnels que l'on invoque tant en faveur d'une thèse (commencement du monde) qu'en faveur de l'autre (éternité du monde) ne sont que probables. La vérité échappe à l'ordre démonstratif, et seule la foi invite à admettre que le monde ait commencé d'être. La foi tranche ce que la raison (ou la science) ne peut décider.

Les professeurs de la Faculté des arts adhèrent eux aussi à la thèse religieuse d'un début du monde, mais ils demeuraient néanmoins convaincus que la raison humaine démontrait la conclusion contraire et qu'une fois cela dit, le physicien disait l'évidence. Comment était-ce possible ? Il avait-il vraiment deux vérités contraires ? Même si d'autres sciences de l'époque s'occupent de cette question (la métaphysique et la mathématique), la physique permet de comprendre l'enjeu.

FOI ET SCIENCE INDÉPENDANTES

La physique du XIII^e siècle exploite les notions de temps, d'espace, de mouvement et de matière, en étudiant la nature, soumise au mouvement et au changement. Dépourvue des outils mathématiques, cette philosophie de la nature observe les phénomènes, les décrit et en analyse les causes. Or un mouvement naturel, justement, ne peut avoir de commencement, parce qu'en supposant qu'il en eût un, on poserait un mouvement antérieur à ce premier mouvement. Pour



J.-L. Charnet

Jusqu'à l'âge de 20 ans, les étudiants suivent des cours de logique et de philosophie à la Faculté des arts. Après y avoir eux-mêmes enseigné pendant quelques années, ils entrent ensuite à la Faculté de médecine, à la Faculté de droit ou à la Faculté de théologie. À partir de 1251, ils étudient les textes d'Aristote, qui soutient que le monde est éternel, contrairement aux écrits bibliques. Raison, foi et science sont à cette époque si étroitement imbriquées que de violentes disputes sur l'éternité traversent la fin du XIII^e siècle.

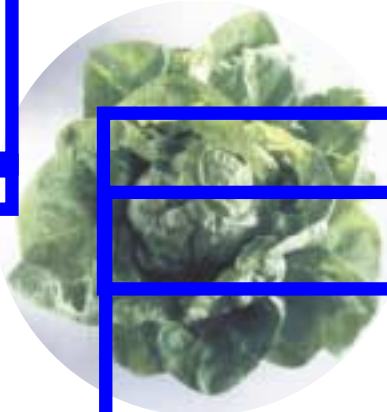
être produit, le premier mouvement exigerait d'être engendré, il exigerait une transformation qui serait elle-même déjà un mouvement. Nous voilà donc confrontés à l'absurde hypothèse d'un mouvement antérieur au premier mouvement. Seul moyen d'en sortir du point de vue de la physique : dire que le mouvement, donc le monde, n'a pas eu de commencement. Ainsi, le physicien est acculé à cette conclusion de l'éternité du monde : il part des principes propres de sa science, la nature, et dit vrai lorsqu'il affirme que le monde n'a pas commencé. La physique d'Aristote n'est pas réfutable.

Toutefois, le chrétien dit vrai lui aussi lorsqu'il affirme que le monde a commencé. Comment dénouer ce nœud ? Selon le philosophe logicien Boèce de Dade, la double thèse n'est pas contradictoire, parce que la foi invoque une cause (Dieu créateur) supérieure à celle des principes de la physique, une cause qui se situe hors du champ d'investigation de la physique ; le domaine de la foi et celui de la physique sont d'ordre différent, et rien n'empêche que l'un et l'autre soient vrais (c'est la troisième position philosophique de l'époque).

Ainsi : La conclusion où le physicien dit que le monde et le premier mouvement n'ont pas commencé est fautive absolument (car la foi dit le contraire), mais si on la réfère aux preuves et aux principes à partir desquels elle est démontrée, elle en découle bel et bien.

Bien que la raison et la science acquièrent progressivement leur autonomie vis-à-vis de la foi, les philosophes sont tellement empreints de culture religieuse qu'ils cherchent tous une conciliation harmonieuse entre les exigences rationnelles et les requêtes de la foi. Ce faisant, ils élaborent une subtille différenciation entre les différents objets du savoir, ce qui est à leurs yeux le meilleur moyen d'assurer la diversité des méthodes scientifiques. Ils remplissent ainsi la tâche que l'institution universitaire exigeait d'eux : exercer leur métier de philosophes, sans concession. L'évêque de Paris ne l'avait pas compris qui, en 1277, comptait définitivement empêcher que le monde fût éternel.

François-Xavier PUTALLAZ est professeur de philosophie à l'Université de Fribourg, en Suisse.



Le goût de l'aliment

HERVÉ THIS

La texture des vinaigrettes détermine leur arôme.

Les cuisiniers le savent : l'excès de farine rendait la sauce Explorateur. Le goût des aliments ne dépend pas seulement des molécules aromatiques présentes, mais aussi des interactions moléculaires ; des molécules au goût neutre, telles les protéines ou les molécules de l'amidon, se lient à certains arômes, prévenant l'action de ces derniers sur nos sens. Quels arômes sont-ils ainsi masqués ?

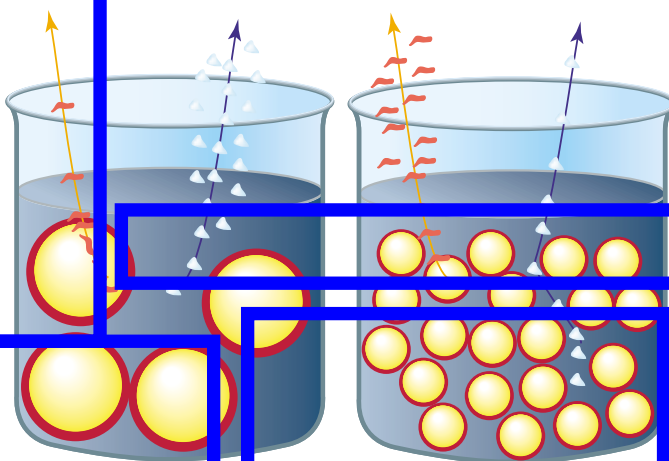
On ne peut se contenter de chercher les liaisons chimiques possibles entre les diverses molécules présentes, car la structure physique de l'aliment intervient également.

Déjà dans les phases homogènes, telles les solutions, la libération des arômes dépend de la viscosité. Toutefois les aliments sont plutôt des systèmes dispersés : des bulles d'air sont emprisonnées dans des liquides ou dans des solides (mousses), des gouttes d'huile sont dispersées dans l'eau (émulsions), des particules solides sont réparties dans des liquides (suspensions)... Aussi les molécules aromatiques qui sont présentes au sein des phases dispersées ou continues ne se libèrent pas de la même façon que si elles étaient simplement dissoutes.

Pis encore, dans les émulsions, par exemple, les gouttelettes d'huile dispersées sont limitées par des couches de molécules tensioactives ; celles-ci, par leur double solubilité dans l'huile et dans l'eau, se font quelquefois obstacle aux arômes, qui sont alors inaccessibles au dégustateur. Afin d'identifier les phénomènes qui déterminent la libération des arômes, Martine Charrier, Anne Guichard et leurs collègues de l'INRA et de l'ISBANA à Dijon ont étudié des sauces pour salade, en collaboration avec des chercheurs de la Société Amora-Maille.

Dans les vinaigrettes étudiées – des émulsions –, la phase aqueuse était un mélange de vinaigre de vin, de jus de citron et de sel. Des gouttes d'huile de

tourne-soleil étaient émulsifiées grâce à des protéines du petit lait ; enfin un mélange de xanthane (un polymère obtenu par fermentation microbienne de glucosyl- γ -D-amidon) stabilisait la sauce. À cette vinaigrette de base, les physico-chimistes avaient ajouté des quantités connues d'arômes : de l'allyl isothiocyanate, dans la phase huile, donnait une note moutarde, tandis que du phényl-2-éthanol et de l'éthyl hexanoate, dans la phase aqueuse, donnaient respectivement une note rose et une note fruitée. Plusieurs émulsions



Quand les gouttes d'huile sont grosses, les arômes solubles dans l'eau sont mieux perçus, les arômes lipophiles ne le sont pas. Cette situation est inversée dans les émulsions plus fines.

ont été préparées avec des gouttelettes d'huile d'une taille particulière. Un jury de dégustation entraîné évaluait les diverses sauces notant l'intensité de descripteurs : la note citron, la note vinaigre, la note moutarde...

Le résultat des tests gustatifs est difficile à analyser : le goût acide étant prépondérant, les dégustateurs peinent à décrire les autres sensations. Toutefois, avec de l'entraînement, ils perçoivent que l'intensité de l'arôme total, du goût œuf, de l'odeur d'œuf, du goût moutarde et du goût beurre augmentent avec la taille des gouttes d'huile ; inversement l'intensité de l'odeur d'agrumes diminue quand la taille des gouttes d'huile augmente.

Pour interpréter ces observations, les chercheurs ont analysé les concentrations en arômes volatils dans l'air au-dessus des sauces. Ces analyses indiquent que les composés solubles dans l'eau sont présents en concentrations réduites dans l'air quand la taille des gouttes d'huile diminue. Inversement les molécules solubles dans l'huile sont alors plus abondantes.

Examinons l'origine de ces différences, d'abord pour les arômes solubles dans l'huile. Quand les émulsions sont fortement atténuées, à proportions d'huile et d'eau fixées, les gouttelettes d'huile sont plus nombreuses et plus petites : les arômes lipophiles ont moins de distance à parcourir pour atteindre la surface des gouttes. En outre, comme la surface totale de l'interface huile-eau est augmentée, les molécules tensioactives forment une couche plus mince, à la surface des gouttes d'huile : les arômes lipophiles diffusent plus facilement à l'extérieur des gouttes. Enfin ils sont des épaisseurs d'eau inférieures à traverser (où ils se mélangent aux épaisseurs) avant d'atteindre l'air qui surmonte les émulsions.

Pour les arômes solubles dans l'eau, l'effet est inverse : les émulsions aux petites gouttelettes étant plus visqueuses, ces arômes diffusent plus difficilement, dans une couche d'eau plus mince, et ils sont alors moins perçus.

Ces lois sont-elles générales ? Comme les aliments contiennent des molécules variées, de nombreuses études s'imposent afin de quantifier tous les mécanismes et d'évaluer enfin leurs importances relatives : « La vie est courte, l'art est long, l'occasion fugitive, l'expérience trompeuse, le jugement amer », disait Hippocrate.

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science le 26 juin 2000, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

■ POUR LA
SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

~~soit 4 € seulement par numéro au lieu de 5,20 €~~

Pour consulter et télécharger
en toute liberté sur www.pourlascience.fr
les 12 prochains numéros
~~dès leur parution.~~



Oui, je m'abonne
à Pour la Science 100% numérique
1 an (12 numéros) pour 48 €

~~Je préfère découvrir toutes~~
~~les offres d'abonnement disponibles~~
en cliquant ici.

Réchauffement climatique et papillons

Le réchauffement modifie l'aire de répartition des papillons.

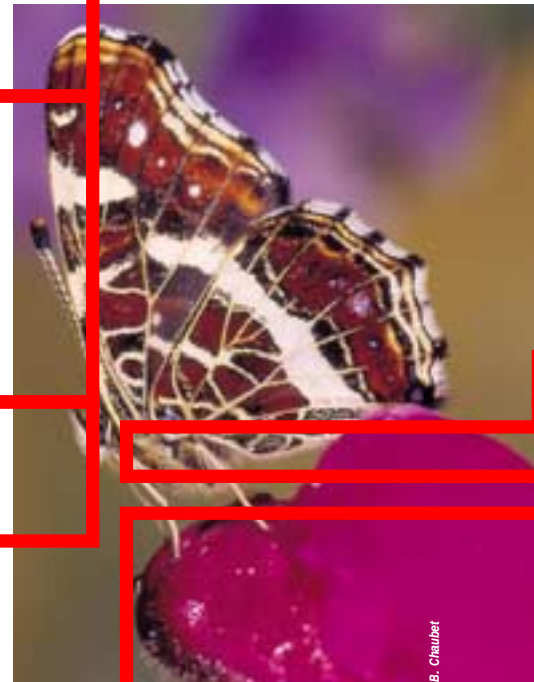
Les populations des papillons ne sont pas stables géographiquement. Certaines espèces régressent, mais d'autres, moins nombreuses, s'étendent. Le *Benthis daphne*, par exemple, a gagné plusieurs centaines de kilomètres vers le Nord en quelques dizaines d'années. Au début du xx^e siècle, cette espèce subméditerranéenne ne s'étendait pas au-delà de la moitié Sud du Massif central ; aujourd'hui, on la trouve en forêt de Fontainebleau et sur le flanc Est des Vosges. Les causes de ces déplacements sont multiples, mais Henri Descimon, du Laboratoire de systématique évolutive de l'Université de Provence, a montré avec une équipe internationale que, pour la plupart des espèces de papillons non migratoires, c'est-à-dire d'espèces qui, habituellement n'ont pas de variations d'aire géographique à court terme. Ces

déplacements sont liés au réchauffement climatique.

Pour analyser ce lien, les entomologues ont étudié la répartition de plusieurs dizaines d'espèces de papillons non migratoires dans plusieurs pays. En particulier, ils ont examiné le mouvement des limites Nord et Sud de ces aires. Plus de 60 pour cent des espèces étudiées s'étendent vers le Nord, alors qu'une extension vers le Sud a été notée chez moins de trois pour cent des espèces.

Depuis une centaine d'année, l'Europe s'est réchauffée d'environ 2,5 °C de sorte que les lignes isothermes se sont déplacées vers le Nord d'une centaine de kilomètres, une distance du même ordre que celle du décalage vers le Nord des aires de répartition effectivement observées. D'autres facteurs locaux sont parfois en cause, mais en réaction au réchauffement, les populations de papillons se décalent vers le Nord.

Pour certaines espèces dont l'extension est également avérée, d'autres causes que le réchauffement ont été établies. La Carte géographique (*Araschnia levana*), s'est étendue dans toute la

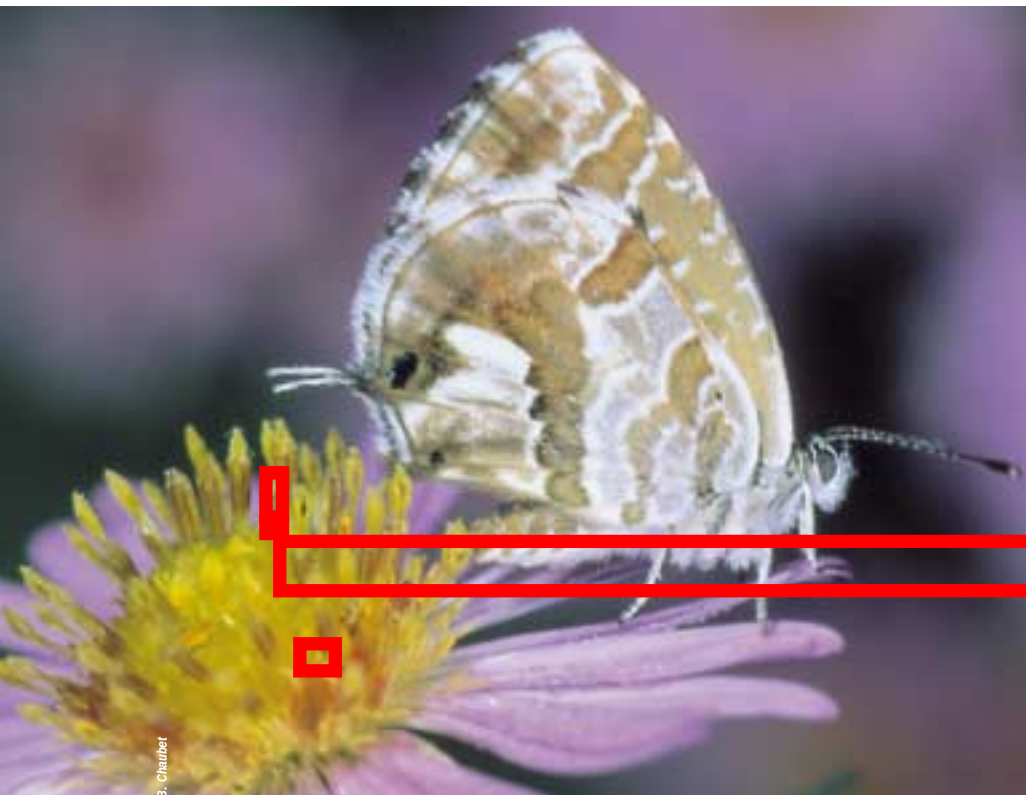


La Carte géographique (*Araschnia levana*) progresse dans toute la France.

France, excepté en région méditerranéenne. La raison en est vraisemblablement la prolifération des friches à orties, hôte de ce papillon. Des espèces jusqu'alors exotiques, font leur apparition. Le Brun des pélargoniums (*Cacyreus marshalli*), débarqué en France en 1997, arrive d'Afrique du Sud, par les Baléares, puis l'Espagne. Ce papillon profite d'un engouement culturel pour les Géraniums (pélargoniums), hôtes communs des balcons et des pergolas. La ponte de ces papillons se effectue sur les boutons floraux de cette plante. Son acclimatation au Sud de la France est attestée : depuis trois ans, sa prolifération a été foudroyante des Pyrénées orientales au Var.

Malgré des conditions nouvelles, certaines espèces de papillons s'adaptent. Toutefois, le réchauffement climatique que nous avons connu au xx^e siècle est bien inférieur à ce qu'il sera au siècle prochain (entre 2 °C et 5 °C selon les prévisions). Si ce réchauffement décale encore plus fortement les papillons vers le Nord, reste à savoir combien d'espèces pourront s'étendre aux latitudes supérieures, où les milieux naturels sont plus dégradés. Seuls les colonisateurs les plus efficaces y parviendront. D'autres espèces disparaîtront.

Bernard CHAUBET,
BIO3P, INRA-ENS, Rennes.



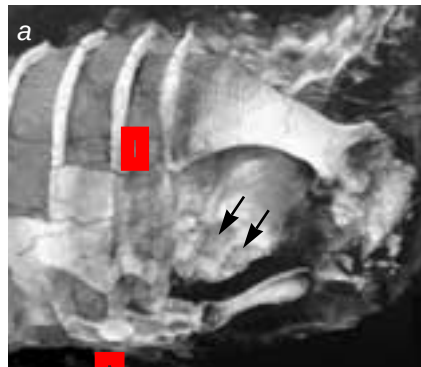
Le Brun des pélargoniums (*Cacyreus marshalli*) est un papillon exotique qui envahit la France depuis 1997 en profitant de l'engouement pour les géraniums, dont c'est l'hôte obligé.

Un dinosaure au sang chaud

L'analyse tomographique d'un fossile montre que certains dinosaures avaient une température corporelle de celui des mammifères et des oiseaux actuels.

Après quelques centaines de mètres, le prédateur abandonne la poursuite... et sa proie. Celle-ci, un herbivore, reprend son souffle : son cœur bat la chamade pour alimenter en oxygène les muscles sollicités pendant la fuite. Cette scène se passe il y a 66 millions d'années, à la fin du Crétacé, et met en scène deux dinosaures peu avant l'extinction du groupe. La communauté des paléontologues est partagée : les reptiles avaient-ils le sang chaud, c'est-à-dire maintenu à température constante comme chez les mammifères et les oiseaux actuels, ou, à l'inverse, la température corporelle suivait-elle la température ambiante comme chez les reptiles ?

L'analyse au scanner d'un fossile mis au jour dans le Dakota du Sud



montré que certains dinosaures avaient un cœur plus proche de celui des mammifères et des oiseaux actuels que celui des reptiles, auxquels ils sont apparentés. Cette

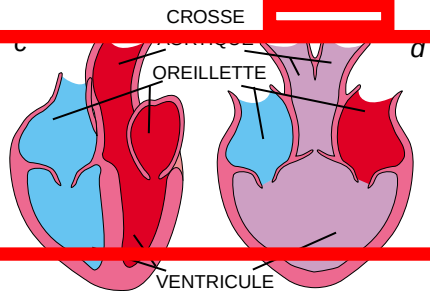
découverte étaye l'hypothèse d'animaux au sang chaud.

En Caroline du Nord, Dale Russell, Paul Fischer et leurs collègues ont acquis récemment le fossile d'un dinosaure du groupe des ornithomimes (leurs pieds ressemblaient à ceux des oiseaux) : cet animal (un théscélosaure) de quatre mètres de longueur pesait 300 kilogrammes. Outre le squelette, la roche où il a été découvert abritait également des tissus mous minéralisés dont seul un environnement pauvre en oxygène permet la conservation. De tels vestiges sont extrêmement rares !

La tomographie du thorax a fourni des images de « tranches » de quatre millimètres qu'un ordinateur a combinées en une image tridimensionnelle. Les paléontologues y ont alors découvert les traces d'un cœur d'environ 2 000 centimètres cubes (deux litres), à quatre cavités et comportant une seule crosse aortique, comme le cœur des mammifères et des oiseaux ; le cœur des reptiles actuels a trois cavités et deux cosses aortiques (voir la figure).

Dans le cœur des reptiles, le sang riche en oxygène en provenance des poumons et le sang appauvri en oxygène, après avoir circulé dans tout l'organisme, se mélangent dans un ventricule unique qui expulse l'ensemble dans les deux cosses artérielles : la circulation en oxygène n'est jamais très élevée.

À l'inverse, le cœur des mammifères et des oiseaux est divisé en deux parties distinctes par une cloison interventriculaire qui empêche le sang riche en oxygène et le sang riche en dioxyde



La tomographie (a, les flèches indiquent les deux ventricules) du fossile d'un théscélosaure (b) vieux de 66 millions d'années montre que ces animaux avaient un cœur plus proche de celui des mammifères (celui d'un être humain est représenté en c) ou des oiseaux actuels que de celui des reptiles actuels (celui d'un amphibien est représenté en d). Le cœur des oiseaux et des mammifères a quatre cavités distinctes (deux oreillettes et deux ventricules) et une aorte qui alimente l'ensemble de l'organisme : le sang oxygéné en provenance des poumons (en rouge) et le sang pauvre en oxygène (en bleu) ne se mélangent pas. En revanche, le cœur de la plupart des reptiles (à droite) a trois cavités (deux oreillettes et un ventricule) et deux cosses aortiques qui distribuent un sang mêlé (en violet).

BRÈVES

Un GPS plus précis

Le Pentagone vient de supprimer la « disponibilité sélective » des signaux émis par les satellites de positionnement global GPS. Désormais, tout possesseur d'un récepteur GPS peut se localiser sur Terre avec la même précision que celle qui est utilisée par l'armée américaine pour guider ses missiles. Pourquoi ? Parce que les militaires américains ? Parce qu'ils ont mis au point un nouveau dispositif qui brouille ce signal haute précision en cas de conflit, région par région. Le projet de localisation européen, *Galileo*, ne devrait pas être abandonné, car la nécessité de rester indépendant des Américains est forte.

Anglisme fortuit

Le télescope spatial *Hubble* vient de révéler un alignement de galaxies si parfait qu'il paraît irréal. La galaxie au premier plan est une spirale vue de face, située à 120 millions d'années-lumière.

La seconde est aussi une spirale, plus grosse, située à 20 millions d'années-lumière derrière la première. Cet alignement permet de voir le matériau sombre de la galaxie au premier plan, parce qu'il découpe sur la galaxie arrière, un peu comme si l'on avait mis un écran clair derrière la première galaxie ; c'est une occasion unique d'étudier les nuages de poussières interstellaires, leur répartition et la quantité de lumière de la galaxie arrière qu'ils absorbent.

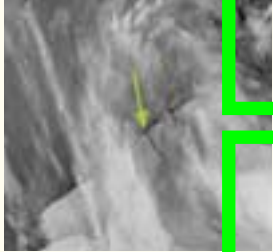


Du poisson pour nos ancêtres

Dans les roches des plages et dans les récifs coralliens des côtes de la mer Rouge, des géologues mexicains ont mis au jour des outils de pierre vieux de 125 000 ans. Ces outils suggèrent que les hominidés occupaient le littoral pour exploiter les ressources marines. La sécheresse de l'époque aurait poussé nos ancêtres à s'établir au bord de la mer, où ils trouvaient de quoi se nourrir. C'est peut-être aussi à partir de cette côte de l'Érythrée que les hominidés ont migré de l'Afrique vers le Moyen-Orient, puis vers l'Asie.

Un iceberg géant

Le plus grand iceberg jamais observé s'est détaché, à la fin du mois de mars, de la calotte glaciaire de la mer de Ross, dans l'Antarctique. Grâce au satellite



européen ERS-2, qui mesure la température à la surface de la Terre et dont l'orbite

mesure environ 300 kilomètres de longueur sur 40 de largeur. Le satellite

ERS-2 le suivra. D'après les déplacements des gros icebergs précédemment observés, celui-ci pourrait se déplacer à 30 kilomètres par heure.

Diagnostic de Creutzfeldt-Jakob

Quelles sont les conséquences, pour l'homme, de l'épidémie de vache folle qui frappe la Grande-Bretagne et d'autres pays d'Europe? On l'ignore encore, car on ne dispose d'aucun test diagnostique du variant de la maladie de Creutzfeldt-Jakob, une forme de la maladie qui serait transmise à l'homme par les vaches contaminées. Le diagnostic définitif n'est établi qu'après analyse du cerveau des personnes décédées. Une méthode non invasive permettrait un diagnostic précoce : on disposerait ainsi de données épidémiologiques précieuses pour évaluer la prévalence de cette maladie. Des Anglais ont montré que les personnes dont on pense qu'elles sont atteintes du nouveau variant de la maladie présentent sur une image IRM de leur cerveau deux petites zones du thalamus où le signal est anormalement intense. Ce pourrait être un critère diagnostique.

Le chromosome 21 séquencé

Il contient 25 gènes (le chromosome 22 séquencé récemment en contient 545). À eux deux, ces chromosomes portent 770 gènes, et le nombre total de gènes de notre patrimoine génétique a été revu à la baisse : on l'estime aujourd'hui à 40 000 (les premiers estimations étaient plus du double). Maintenant que l'on connaît tous les gènes de ce chromosome, on devrait reconnaître plus facilement ceux des maladies génétiques liées au chromosome 21 et, par conséquent, les protéines impliquées. Et, bien sûr, nous devrions améliorer notre compréhension de la trisomie 21, où coexistent trois chromosomes 21 au lieu de deux.

de carbone de se mêler. Les mammifères et les oiseaux sont alimentés par un sang riche en oxygène qui attend une régénération rapide après un effort.

Une autre question taraude les paléontologues : les dinosaures ont-ils dominé la Terre pendant plus de 200 millions d'années alors que le thécosauridé découvert est un des derniers dinosaures : il vivait un million d'années avant l'extinction de ces animaux. Le cœur à quatre cavités est-il un caractère ancestral commun à tous les dinosaures, ou bien ce caractère a-t-il évolué parallèlement chez les archimétopodes et dans un autre groupe de dinosaures, les théropodes (la famille du tyrannosaure), que l'on pense être les ancêtres des oiseaux actuels? Quelle que soit la réponse, l'existence de deux circulations complètement séparées a sans doute permis aux dinosaures un « style de vie » plus actif que celui des reptiles actuels.

Franchissement de stop

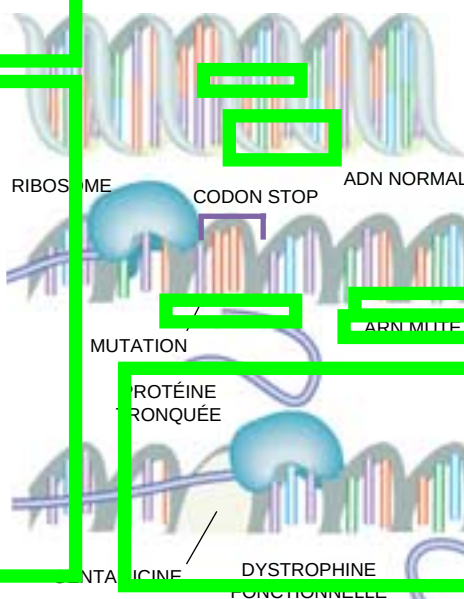
Un antibiotique assurerait une réexpression partielle de la dystrophine, la protéine qui manque aux personnes atteintes de myopathie de Duchenne.

Dès que l'on a découvert les antibiotiques et leur remarquable puissance antibactérienne, on a constaté que ces substances perturbent les bactéries de diverses façons. Ils sont notamment la cause de nombreux erreurs de traduction, lorsque les gènes de bactéries s'expriment et produisent la synthèse des protéines. De cette

propriété qui contribue à tuer les bactéries, les biologistes ont fait une arme potentielle contre une maladie génétique grave, la myopathie de Duchenne.

Cette maladie est due à l'absence de dystrophine, une protéine qui assure l'architecture des cellules musculaires et les propriétés contractiles des muscles. Or, la gentamicine, appliquée sur des cultures de cellules où certains gènes ne s'expriment pas, déclenche la production des protéines manquantes. Dès lors il était intéressant de tester la gentamicine sur des souris mutantes qui ne fabriquent pas la dystrophine. On a constaté que, chez certaines de ces souris, le gène de la dystrophine s'exprime en présence de gentamicine. Les souris sensibles à l'action de la gentamicine retrouvent une certaine activité musculaire.

La myopathie de Duchenne résulte toujours de l'absence de dystrophine, mais la cause varie. Diverses anomalies génétiques, des délétions (le gène est amputé), des duplications ou des mutations, peuvent être responsables d'une absence de production de la précieuse protéine, ou de la production d'une protéine qui n'est pas fonctionnelle. En ce qui concerne les mutations, elles sont localisées de façon aléatoire dans le gène, ce qui aboutit parfois à l'apparition de codons stop, les séquences géniques qui indiquent à la machinerie cellulaire de production des protéines, l'endroit où chaque protéine s'arrête. Or, les souris chez qui le traitement par la gentamicine est efficace ont un gène de dystrophine entier et correct à ceci près qu'un codon qui devrait donner un acide aminé est muté en codon. La mutation qui fait apparaître un codon de terminaison entraîne un arrêt précoce de la traduction :



Lorsqu'un ribosome, l'usine de fabrication des protéines, rencontre, sur l'ARN de la dystrophine, un codon stop, il cesse de produire la protéine. La protéine tronquée est inactive. Or, la gentamicine, un antibiotique, favorise les erreurs que font les ribosomes. Ici, en « masquant » le codon stop, il permet la production d'une protéine entière, fonctionnelle. L'administration de gentamicine à des souris atteintes de myopathie assure une production de dystrophine suffisante pour restaurer partiellement l'activité musculaire.

Les phoques ont la grippe

On a montré que les phoques peuvent être infectés par le virus B de la grippe. On sait que le virus A de la grippe contamine certains oiseaux, le virus C les porcs mais on ne connaissait pas



de réservoir naturel du virus B. Une équipe hollandaise a montré que le virus

semblait beaucoup à celui qui a infecté l'homme en 1994-1995. Ces animaux seraient-ils des réservoirs des virus qui ont contaminé l'homme par le passé, et ces virus emmagasinés pourraient-ils menacer l'homme à nouveau?

Des pandas défaillants

En Chine, les pandas sont en voie de disparition (il ne reste aujourd'hui qu'environ 1 000 individus, à l'abri du braconnage dans des parcs naturels), et leur aptitude sexuelle ne va pas contribuer à leur survie.

Cette espèce ne fait que 10 à 20 secondes, laissant ainsi peu de chance à l'ovule de la femelle d'être fécondé. Des zoologues chinois ont traité ce manque d'appétit par le Viagra® : ce traitement prolonge les rapports des pandas jusqu'à 20 minutes. La pilule bleue réussira-t-elle là où l'éthologie a échoué?

Contre la stérilité

Certaines stérilités féminines résultent d'une anomalie du cytoplasme, le matériau qui entoure le noyau de toute cellule et, notamment, de l'œuf. Les femmes atteintes peuvent bénéficier de dons d'ovules, mais les chercheurs ont mis au point une méthode qui leur permettrait de transmettre leur propre patrimoine génétique. La méthode consiste à transférer le noyau d'un œuf de la mère dans un œuf dont on a retiré le noyau. Cet œuf hybride constitué du noyau de la mère et du cytoplasme d'une autre

fécondation *in vitro*. Le patrimoine génétique de l'enfant serait constitué du génome du père, du matériel génétique nucléaire de la mère, mais aussi du génome extranucléaire de l'autre femme ; en effet quelques gènes, les gènes mitochondriaux sont présents dans le cytoplasme et – normalement – transmis par la mère.

données, les astronomes de la collaboration *Boomerang* ont présenté une carte plus précise : la gamme d'échelles angulaires étudiées s'étend de quelques dizaines de minutes d'angle à quelques degrés.

Comment comparer cette carte des fluctuations aux modèles cosmologiques ? À l'aide d'une fonction qui mesure l'amplitude des fluctuations de température à chaque échelle angulaire, nommée spectre de puissance angulaire. Les oscillations de l'époque du découplage se traduisent dans cette fonction par deux pics : le premier pic reflète la compression sous l'effet de la gravité, le second pic correspond à une dilatation due à la pression de radiation.

Bien que l'expérience *Boomerang* n'ait couvert qu'un pour cent du ciel, les astronomes ont détecté les deux premiers pics. Le premier se trouve à une échelle angulaire d'environ un degré. Grâce à ce pic, on connaît la taille des fluctuations de densité initiales, que l'on peut relier, à l'aide d'un modèle, à la quantité de matière de l'Univers et donc à sa courbure (Albert Einstein a montré que la matière courbait l'espace). Ce pic permet aux astronomes d'affirmer que l'Univers est plat.

Quelle est l'origine des fluctuations initiales ? Des fluctuations quantiques apparues lors d'une phase d'inflation cosmique, ou quelques instants après le Big Bang, l'Univers croît de façon quasi exponentielle. Toutefois, en se fondant uniquement sur la position du premier pic, et avec les incertitudes des mesures expérimentales, les germes des premières structures pourraient aussi résulter de perturbations engendrées par des défauts topologiques, des concentrations d'énergie issues des transitions de phase que l'Univers a traversées au cours de son expansion. Le présence d'un second pic permet la distinction : les modèles de défauts topologiques ne prédisent pas de pics secondaires.

Pour l'instant, quelques pour cent seulement des données obtenues par *Boomerang* ont été utilisées. Un long travail d'analyse attend encore les astronomes. D'autres expériences détailleront la situation : l'expérience ballon MAXIMA publiera dans quelques semaines des résultats montrant des spectres à des échelles légèrement inférieures et surtout le satellite MAP qui sera lancé au printemps 2001, précisera la position et l'amplitude des pics secondaires et mesurera ainsi plusieurs paramètres cosmologiques fondamentaux. Grâce à la sensibilité des détecteurs, sans cesse améliorée, la cosmologie change de statut : de science théorique, elle devient science d'observation.

Alejandro GANGUI,
Observatoire de Paris-Meudon
Laurent VERSTRAETE,
Institut d'astrophysique spatiale, Orsay.

La matière noire dans tous ses états

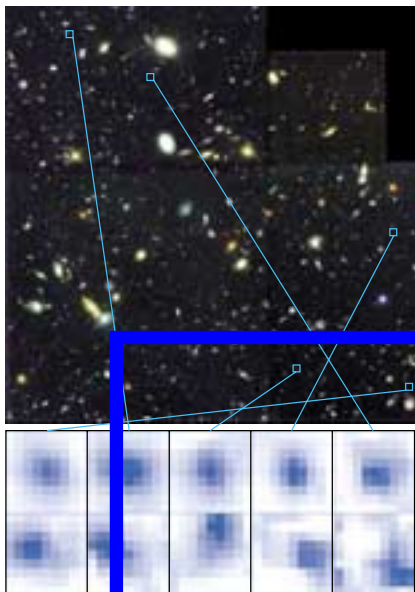
De la matière noire à grande échelle dans le halo galactique.

De quoi est fait l'Univers ? En partant de la matière lumineuse, mais aussi de matière noire dont les astronomes ignorent jusqu'à la nature. La recherche de cette matière vient de franchir une étape : l'équipe de Yannick Mellier, à l'Institut d'astrophysique de Paris, a décelé de la matière noire à l'échelle de l'Univers et une équipe franco-allemande a montré que, dans le halo de notre Galaxie, une partie de la matière noire est constituée de naines blanches, des étoiles très peu lumineuses.

Dans les années 1930, Fred Zwicky montre que le mouvement des galaxies dans les amas ne s'explique pas à partir de la seule présence de matière dans les objets lumineux. Autrement dit, pour expliquer en termes de mécanique céleste les vitesses mesurées des galaxies, on doit supposer la présence dans les amas d'une matière invisible. C'est la « connaissance » de la matière noire. Plus tard, dans les galaxies elles-mêmes, des arguments dynamiques analogues indiquent la présence de matière noire.

Portant sur de la matière noire lointaine (l'Univers à grande échelle), la première découverte est la déviation de la lumière par la matière, effet prédit par Einstein il y a presque un siècle. En particulier, l'interposition entre les galaxies lointaines et la Terre de grandes quantités de matière, même invisible, distribuée non uniformément, déforme faiblement l'image des galaxies. Ces déformations correspondent à un effet de lentille gravitationnelle nommé astigmatisme cosmique.

Par cette méthode, les astronomes ont mis en évidence la présence de matière noire dans l'Univers à très grande échelle c'est-à-dire à l'échelle des regroupements d'amas de galaxies. À l'aide du télescope CFH d'Hawaii, les astronomes ont cartographié une portion du ciel équivalant à 16 fois la surface de la Lune et ils ont mesuré la déformation de 200 000 galaxies. La difficulté de la mesure consiste à séparer la déformation intrinsèque des galaxies, due à leur projection sur la voûte céleste (les galaxies sont des objets tridimensionnels que nous voyons en deux dimensions), de la déformation due à l'astigmatisme. Cette dernière oriente l'image des galaxies comme un aimant oriente la



Cette image (en haut), obtenue après une semaine de temps de pause, recense des objets de faible luminosité. La vaste majorité des objets sont des galaxies très éloignées, mais cinq traces bleues ont bougé lorsque l'on compare cette image à une image analogue prise deux ans plus tard (sur la ligne supérieure, la position des objets en 1996, au-dessous, leur position deux ans plus tard). Ces objets sont des étoiles bleues très faibles qui appartiennent vraisemblablement au halo de notre Galaxie.

limaille de verre selon les lignes de champ magnétique ou comme le verre cathédrale déforme les images. Ainsi, par une analyse statistique, les astronomes discriminent les deux effets.

En retranchant la déformation intrinsèque, les astronomes ont noté une déformation résultante qui s'explique par la présence de matière noire à très grande échelle. Sans la contribution dominante de cette matière, les grandes structures des amas et des superamas de galaxies ne dévièrent pas suffisamment la lumière et on n'observerait pas tant de déformation des galaxies. Pour l'instant, l'effet a seulement été mis en évidence, mais, à terme, cette méthode donnera d'importants renseignements pour la cosmologie : d'une part, la quantité de matière noire modifie la dynamique de l'Univers dans son ensemble ; d'autre part, les mesures fondées sur cette technique permettront de déterminer la répartition de la matière noire à grande échelle, ainsi que la répartition de matière dans l'Univers, puisque la matière noire est la principale composante de l'Univers.

Si cette mesure indique la présence de matière noire à grande échelle, elle ne donne aucun renseignement sur sa nature. Dans notre Galaxie, les astronomes supposent depuis longtemps qu'une partie au moins de la matière noire serait constituée des restes des premières étoiles, situées

dans le halo qui entoure le disque de notre Galaxie. Une autre équipe d'astronomes s'est attelée à leur recherche.

Comme le fera le Soleil dans des milliards d'années, la plupart des étoiles terminent leur évolution après avoir épuisé leur combustible nucléaire. Les vestiges de ces étoiles, nommés naines blanches, se refroidissent et deviennent de moins en moins lumineux. Comment les repérer ? Grâce à leurs vitesses propres : les étoiles du halo, entraînées autour du centre de la Galaxie, ont des vitesses importantes, de sorte qu'on peut les voir bouger.

Pour détecter ces objets de faible luminosité, les astronomes ont comparé des photographies de ciel profond prises à deux ans d'intervalle par le télescope spatial *Hubble*. Ces photographies sont prises avec des temps de pose de l'ordre d'une semaine, de sorte que les objets très peu lumineux peuvent apparaître. En comparant ces images, les astronomes ont vu des objets qui ont bougé entre les deux prises de vue (voir la figure).

Intéressés par cette découverte, Rodrigo Ibata et ses collègues de l'Institut Max Planck de Heidelberg ont comparé de nombreuses plaques photographiques d'archives qui comportent des prises de vue réparties sur plusieurs dizaines d'années. Là encore, ils ont identifié trois objets, situés à 100 années lumineuses qui seraient déplacés. En enregistrant leur spectre (ce qui n'était pas possible avec les objets vus par *Hubble*, trop peu lumineux), les astronomes ont montré que ces objets sont des naines blanches de couleur bleue qui ont atteint leur stade ultime d'évolution : elles se refroidissent depuis 12 milliards d'années, bien avant que notre Galaxie n'ait été totalement formée.

Cette population d'étoiles avait échappé aux astronomes qui pensaient que les vieilles naines blanches étaient rougies par l'âge : ils recherchaient des objets rouges. Or, les dernières théories d'évolution stellaire indiquent que les naines blanches âgées bleuissent, car elles produisent dans leur atmosphère de l'hydrogène moléculaire dont l'opacité modifie la couleur de l'étoile.

Si les échantillons découverts sont représentatifs d'une nouvelle population d'étoiles, cette dernière formerait une fraction notable de la matière noire de notre Galaxie, mais pas plus que 10 à 20 pour cent, et sans doute moins aux échelles des grandes structures mesurées par l'astigmatisme cosmique. L'astigmatisme cosmique confirme la présence de matière noire à grande échelle, mais la nature de près de 90 pour cent de la masse de l'Univers reste mystérieuse !

Christophe PICHON

Histoire en pièces

La monnaie raconte le passé économique de l'Arménie

Depuis l'antiquité, l'Arménie a été envahie, par les Romains, les Parthes, les Byzantins, les Arabes, les Turcs... Chacun a imposé sa monnaie, comme en témoignent les dizaines de milliers de pièces anciennes découvertes dans ce pays. En utilisant l'ensemble des informations sur les monnaies d'Arménie, des chercheurs ont reconstitué l'histoire économique de la région sur 17 siècles.

Georges Depeyrot, du Centre de recherche historiques de Paris, Anahit Mousheghyan, de l'Institut d'histoire d'Erevan, et leurs collègues ont analysé les documents portant sur les monnaies découvertes en Arménie et sur celles des puissances qui l'ont occupée : ils ont consulté les articles scientifiques, les manuscrits non publiés et les archives des instituts de recherche et des musées de l'ex-Union soviétique. Puis, ils ont examiné les monnaies, ont relevé les indications qui y figuraient, les ont pesées, photographiées, ont déterminé leurs conditions de frappe et les ont rattachées à des types de monnaie déjà connus. Ils ont ainsi établi la chronologie des monnaies, les

quantités émises et cartographié la répartition des pièces découvertes. Les monnaies proviennent de trésors, constitués de centaines de pièces, ou sont des pièces isolées retrouvées sur des sites archéologiques ou dans des champs.

À chaque conflit, le scénario se répétait : les habitants enfouissaient leurs trésors pour les protéger des pillages et ne les rétrouvaient pas toujours, car beaucoup étaient exécutés par les soldats ennemis. Les envahisseurs récupéraient les pièces en circulation pour frapper leur propre monnaie, qui servait à payer les soldats et les commerçants. Ensuite ces pièces étaient disséminées sur les territoires voisins au rythme des échanges.

La monnaie apparaît pour la première fois dans la Grèce antique, au VII^e siècle avant notre ère, et, d'après G. Depeyrot, c'est au IV^e siècle avant notre ère que les premières monnaies à l'effigie d'Alexandre le Grand arrivent en Arménie. Les cartes des découvertes monétaires montrent que l'afflux de monnaie grecque cesse lorsque Alexandre le Grand meurt et que les Grecs quittent la région. Les pièces grecques sont remplacées par de grossières copies arméniennes et par les monnaies des empires voisins : l'Empire romain, à l'Ouest, et l'Empire parthe, à l'Est. Au I^{er} siècle avant notre ère, Tigrane II, roi d'Arménie, conquiert les territoires méridionaux entre ces deux empires, jusqu'en Arabie et la Palestine. Les cartes de répartition des monnaies montrent que Tigrane ouvre

un atelier à Artashat, non loin d'Erevan, peu de temps après avoir conquis Antioche. Les drachmes à son effigie sont de bonne qualité : Tigrane a probablement utilisé les techniques de frappe des Grecs d'Antioche. Les numismates ont montré qu'un million de drachmes de Tigrane circulaient dans le territoire conquis.

En 66, les Romains conquièrent l'Arménie et imposent leur monnaie. Toutes les pièces d'or et d'argent de l'Empire romain sont alors fabriquées à Lyon. Les monnaies découvertes indiquent qu'entre l'an -2 et l'an 4, les Romains frappent leur monnaie dans un atelier qu'ils ont ouvert en Arménie. Ces pièces servent à payer les légions de soldats qui affrontent les Parthes. Après les victoires, chaque soldat reçoit une récompense d'environ 300 deniers, soit 3,2 kilogrammes d'argent. De telles quantités de monnaie auraient été trop lourdes à acheminer de Lyon jusqu'en Arménie et les convois auraient été trop souvent attaqués. Sur place, les Romains utilisaient l'argent récupéré lors de leurs pillages : les pièces parthes étaient fondues pour devenir des pièces romaines.

En Arménie et dans tout le Nord de l'Europe, les importantes concentrations de monnaie d'argent romaine datant du II^e siècle suggèrent que l'Arménie appartenait à la zone d'influence économique de l'Empire romain. Le commerce d'ivoire, de l'ambre, des peaux, des esclaves, ainsi que l'enrôlement de mercenaires au service de Rome, approvisionnaient l'Arménie en monnaie romaine.

À III^e siècle, les Sassanides, d'origine iranienne, succèdent aux Parthes à l'Est de l'Arménie, et repoussent les Romains jusqu'à Antioche. Les cartes de répartition des monnaies sassanides révèlent que cette dynastie avait ouvert un atelier monétaire à Duin, l'ancienne capitale de l'Arménie. Au VII^e siècle, les Byzantins, qui ont remplacé les Romains à l'Ouest de l'Arménie, occupent la région, mais les Arabes la conquièrent en 640. Ces derniers installent aussi un atelier monétaire en Arménie. Ils y frappent des dirhams d'argent, qui circulent de l'Arabie Saoudite à la Scandinavie.

Aux XI^e et XII^e siècles, l'Arménie utilise les pièces des pays voisins, la Géorgie et l'Azerbaïdjan, avant d'être envahie, au début du XIII^e siècle, par les Mongols, lesquels ne connaissent pas la monnaie. Les monnaies géorgiennes et azerbaïdjanaises s'arrêtent de circuler respectivement en 1203 et 1223 : ces dates correspondent aux deux offensives par lesquelles les Mongols se rendent maîtres de la région. Ainsi, les numismates précisent une chronologie ignorée des historiens...



La monnaie d'argent à l'effigie de Tigrane II, roi d'Arménie (en haut à gauche, pièce du I^{er} siècle avant notre ère), circulait (points rouges sur la carte) dans tout le territoire qu'il avait conquis (délimité par les traits bleus). L'abondance des deniers d'argent romains datant du I^{er} siècle (dans les territoires hachurés) et du II^e siècle (dans les territoires en orangé), indique que, pendant ces périodes, un second atelier monétaire romain avait été ouvert en Arménie (le premier se trouvait à Lyon). À partir du III^e siècle, les Sassanides, qui avaient envahi l'Arménie, y frappèrent leur monnaie (en haut, à droite, pièce du VII^e siècle), puis, à partir de 640, les Arabes firent de même. Leurs dirhams (en bas à gauche, pièce du VIII^e siècle) circulèrent de la Scandinavie à l'Arabie saoudite (carrés marron sur la carte).

Une photo sensible

Un nouveau procédé multiplie jusqu'à dix fois la sensibilité des films photographiques.

Un coucher de soleil, un portrait, une fleur... Quel que soit le sujet, les événements qui se succèdent, du clic jusqu'à l'observation du tirage papier, sont toujours les mêmes : pendant un bref instant, un film de plastique recouvert d'une émulsion de gélatine, où sont dispersés des cristaux de bromure d'argent, est exposé à la lumière. Lors de cette exposition, dans chacun des cristaux, les photons convertissent quelques ions argent (Ag^+) en atomes d'argent (Ag). Au cours du développement, les films, où les images restent latentes parce que tous les cristaux sont encore transparents, trempent dans un liquide révélateur qui fait apparaître l'image négative ; certains cristaux noircissent complètement, tandis que d'autres restent intacts. Selon quel critère ? Le nombre d'atomes d'argent par cristal de bromure d'argent : au-delà d'un nombre critique d'atomes d'argent, le cristal s'assombrit.

Aujourd'hui, cinq à dix photons sont en moyenne nécessaires à la conversion d'un ion argent en un atome. Jacqueline Belloni, du Laboratoire CNRS de physico-chimie des rayonnements, à l'Université Paris-Sud d'Orsay, Mona Treguer et Hynd Remita, et René de Keyser, de la Société Agfa Gevaert, ont mis au point un procédé qui augmente

notamment la sensibilité des films photographiques.

Lorsqu'un photon atteint un cristal de bromure d'argent, il arrache un électron d'un ion bromure et crée simultanément, en vertu du principe de l'électroneutralité, un défaut d'électron, nommé trou, qui circule d'ion bromure en ion bromure. Trois scénarios sont alors possibles. Dans le premier, un ion argent positif capte l'électron pour devenir un atome (l'argent est réduit) et le trou migre jusqu'à la périphérie du cristal où il est happé par la gélatine environnante : c'est le cas favorable, puisque ce sont les atomes d'argent qui donnent l'image négative ! Dans un deuxième cas, le trou et l'électron se recombinent et disparaissent en formant un photon qui est émis. Ce phénomène, nommé fluorescence, diminue l'efficacité de la lumière et la qualité de l'image, car le nouveau photon crée parfois un atome d'argent dans un cristal adjacent. Enfin, le trou peut détruire un atome d'argent, qui a été formé par la capture d'un électron : l'atome redevient un ion (voir la figure).

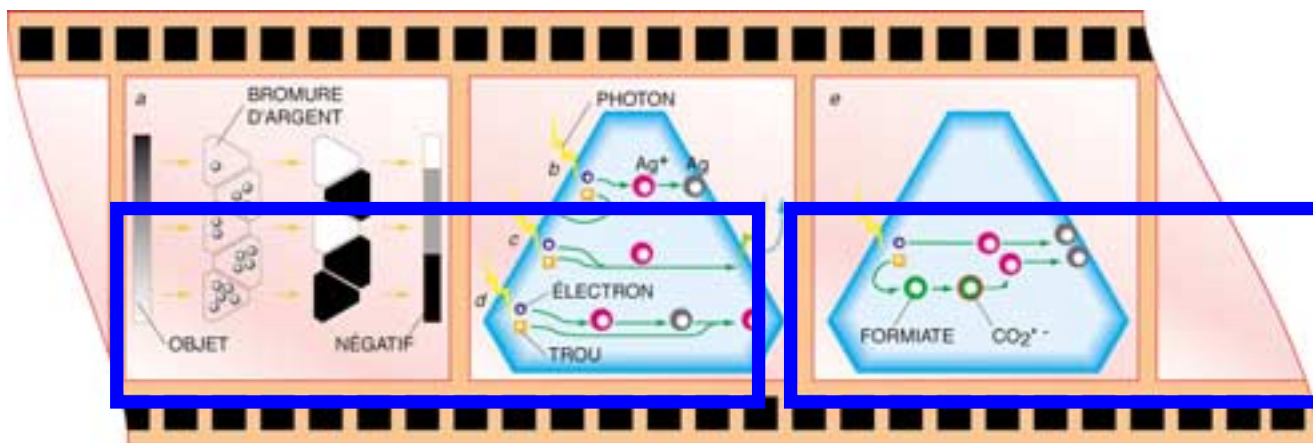
Un peu des trois modes d'action des photons engendrent des atomes d'argent. Comment améliorer ce rendement ? Il s'agit de favoriser la rencontre de l'électron avec un ion argent en écartant le trou. Les chimistes ont eu l'idée de mêler aux ions argent et bromure, avant la formation du cristal, des ions formiates (HCO_2^-). De petite taille, ces ions se substituent à quelques ions bromure pendant la cristallisation du bromure d'argent, et sont de bons capteurs de trous.

Lorsqu'un photon crée une paire électron-trou, l'électron transforme un ion

argent en atome, tandis que le trou est rapidement capté par l'ion formiate qui libère l'hydrogène. La recombinaison du trou et de l'électron n'a plus lieu : la fluorescence, qui est responsable de la perte de 80 pour cent des électrons dans les émulsions standards, est supprimée. De plus, le trou et l'ion formiate forment un ion radical $\text{CO}_2^{\cdot-}$ qui est capable de réduire un second ion argent en un atome dans le même cristal de bromure d'argent. En présence d'ions formiates, un photon transforme ainsi deux ions argent là où il fallait environ dix photons, désormais, un seul suffit.

Le développement des films reste inchangé. Dans un cristal, plus le nombre d'atomes d'argent formés par la lumière est grand, plus la capacité de cet amas à attirer les électrons augmente. Ainsi, le révélateur réduit les cristaux de bromure d'argent à condition que le nombre d'atomes d'argent en amas dépasse le seuil critique, soit environ trois ou quatre par cristal selon le révélateur : les cristaux noircissent. En revanche, lorsqu'un cristal ne contient qu'un ou deux atomes d'argent, il n'est pas réduit par le révélateur et reste transparent.

Grâce au formiate, tous les photons sont efficaces (doublement) : le temps de pose est réduit et le flash, même pour des photographies d'intérieur, est superflu. L'augmentation de la sensibilité permet également de diminuer la taille des cristaux de bromure d'argent des émulsions, laquelle impose la résolution qui est ainsi améliorée. Les photographes amateurs et professionnels peuvent espérer profiter de ces résultats d'ici deux ou trois ans.

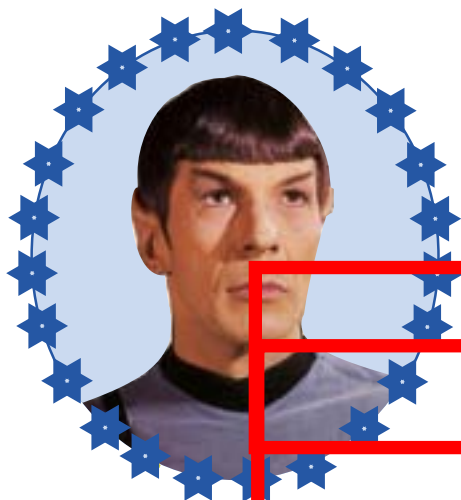


Lors d'une prise de vue (a), dans les cristaux de bromure d'argent, la lumière transforme des ions argent transparents en atomes d'argent. Au-delà d'un nombre critique d'atomes d'argent par cristal (ici, trois), le révélateur noircit tout le cristal : on obtient ainsi le négatif. Lorsqu'un photon heurte un cristal de bromure d'argent (b), il crée un électron (en bleu) qu'un ion argent (en rose) capte pour devenir un atome (en gris), et un «trou» (en orange) qui s'échappe hors du cristal. Toutefois, des réactions parasites diminuent l'efficacité : l'électron et le trou se

recombinent en un nouveau photon (c), ou bien, le trou est capté par l'atome d'argent qui a été formé par la capture de l'électron (d). Au total, trois photons ont formé un seul atome d'argent. Avec des ions formiate (en vert), un photon convertit deux ions argent en atomes (e). Le formiate capture le trou avec lequel il forme un ion radical $\text{CO}_2^{\cdot-}$ (en vert cerclé de rouge), tandis que l'électron est capturé par un ion argent sans réaction parasite. De plus, l'ion radical $\text{CO}_2^{\cdot-}$ transforme lui aussi un ion argent en un atome.

A photograph of a tree frog, likely a species of Hyla, perched on a dark, textured surface. The frog has a light brown or tan body with darker, mottled patterns. A red rectangular box is drawn over the frog's midsection, specifically highlighting the area where the internal organs would be located. The background is dark and out of focus.

Marie-Thérèse Landousy



Logique et calculs de la téléportation

JEAN-PAUL DELAHAYE

Une idée de science-fiction confrontée à la réalité : limites et raisons en matière de téléportation.

Lorsque, exaspéré du retard pris par votre train ou par votre avion vous attendez, bouillonnant de rage sur votre siège ; lorsqu'une grève, un problème technique, une surprise météorologique vous immobilisent des heures entières et vous fait manquer vos rendez-vous ; lorsque, pris dans un embouteillage en plein été, vous respirez à pleins poumons les gaz des pots d'échappement des véhicules environnants et que vous réalisez que vous ne ferez pas la partie de tennis prévue, alors vous rêvez d'un système de transport rapide et infallible qui vous emmènerait sans effort et instantanément – du moins à la vitesse de la lumière – là où vous voulez.

La science-fiction a déjà proposé la solution, et les épisodes de *Star Trek* ou, plus récemment, de *Stargate* ont rendu familiers ces appareillages magiques où, debout dans une armoire transparente, le voyageur se dématérialise, alors qu'au même instant, à des centaines ou à des millions de kilomètres de là, dans une autre armoire transparente, des atomes s'organisent pour le recomposer.

Si l'appareillage de *Stargate* s'apparente au miroir magique d'*Alice au pays des merveilles*, l'effet obtenu est le même qu'avec l'armoire de *Star Trek* : le déplacement sans effort et ultrarapide, objet de vos rêves de forcat du volant, des gares ferroviaires et des terminaux d'aéroport.

Vous vous interrogez : cela sera-t-il possible un jour ? N'y a-t-il pas une impossibilité de principe que la science permet dès maintenant d'énoncer clairement et qui démasquerait irrémédiablement ces histoires de transports fulgurants ?

La science n'est pas une timide demoiselle qui s'interdit toute spéculation, mais au contraire un ensemble d'outils permettant de poser toutes les questions, y compris celles qu'aujourd'hui nous n'arriverons pas à régler. Une spéculation raisonnée ne produit pas nécessairement la vérité, mais a plus de chances de s'en approcher qu'un délire incontrôlé que rien ne modère.

Formuler des réponses précises à ces questions de téléportation est délicat – cela contribue à leur charme –, car de nombreuses considérations doivent être combinées. Nous nous proposons d'abord quelques aspects logiques liés à la téléportation, ce qui nous posera des questions profondes et insolites sur la quantité d'information qui définit un être humain ou sur la nature quantitative ou algorithmique de l'esprit. L'article qui suit, *La téléportation quantique*, détaille les phénomènes quantiques envisageables.

Les modèles de téléportation font appel à divers principes qui respectent plus ou moins les objets et personnes transportés, qui obéissent parfois à un contreplan (plus ou moins détaillé), et qui sont compatibles ou non avec la possibilité de dupliquer les objets ou personnes transportés. Un travail logique de classification s'impose.

La téléportation par raccourcis topologiques

Le premier modèle de téléportation respecte entièrement l'objet déplacé et permet d'aller d'un point à un autre de l'univers sans même se préoccuper de la vitesse de la lumière (nous négligerons ici les effets concernant le temps,

qui accompagnent ou perturbent de tels hypothétiques voyages).

En s'appuyant sur la théorie de la relativité générale d'Einstein ou sur d'autres théories physiques concurrentes de l'espace-temps, à coup de trous noirs, de trous de ver (des sortes de tunnels créant des liens entre des points en apparence éloignés), de plis spatiaux (des déformations de l'espace créant des jonctions inattendues entre points distants) ou d'hyperespaces opportuns (le passage dans une autre dimension habituellement inaccessible engendrant un raccourci), certains physiciens envisagent que l'humanité future, maîtrisant des forces et des énergies sans commune mesure avec celles à notre portée aujourd'hui, modifiera la topologie de l'espace-temps et l'exploitera pour se déplacer d'un point à un autre sans emprunter le chemin naturel.

Ces considérations théoriques très hasardeuses ! En dehors du fait que, parmi les théories en compétition, toutes ne sont certainement pas justes (peut-être aucune) ces théories ne donneront des machines à téléporter qu'en supposant des progrès technologiques que nous ne formulons pas précisément.

Il n'est pas logiquement exclu que certains aspects de notre espace nous échappent encore et que, les ayant compris et maîtrisés, nous n'en tirions un jour des moyens de transport ultrarapides, par création de raccourcis topologiques. L'imagination des mathématiciens et des physiciens théoriciens est telle qu'il leur est possible de plonger notre espace-temps dans d'autres autorisant ces raccourcis miraculeux. Toutefois, entre imaginer et avoir de bonnes raisons de croire, le chemin est long... et peut-être sans raccourcis !

- < Teleport Exit
- < Baggage
- < Hover Cabs
- < Skyway
- < Rentals

1993-94 22 April 2004

AUTOMATIC BALANCE
 ENTROPY DECAY
 ELECTRON LOCK
 DECOHERENCE
 PLANCK FACTOR

QUANTUM
TRANSIT
AUTHORITY

Aujourd'hui donc, même si, sur le plan logique, aucun raisonnement définitif n'interdit de croire à ces jonctions inopinées ou à ces plis heureux, rien de sérieux ne nous permet de soutenir que nous pourrions un jour réaliser des appareils qui nous feraient voyager sans fatigue et sans attente par des raccourcis de l'espace.

Quant aux trous noirs, les physiciens qui étudient leur nature ont démontré que les variations fortes de la gravitation déchiquetaient tout objet physique lors de son entrée dans le trou noir. Cette voie, la plus réaliste (car la physique relativiste est bien attestée et elle prévoit l'existence de trous noirs dont des manifestations indirectes ont été observées), ne conduira donc pas à des outils de transport nouveaux, même dans cent ans ou mille ans.

Notons trois caractéristiques de ces improbables mais possibles voyages par raccourcis topologiques :

- ils n'exigent pas la connaissance préalable de l'objet qui voyage, car celui-ci garde son intégrité, le voyage n'étant finalement qu'un simple déplacement, par un chemin inhabituel ;
- ils permettraient de s'affranchir de la limite de la vitesse de la lumière : sans jamais localement se déplacer plus vite que la lumière, nous pourrions, grâce aux raccourcis empruntés, deux points plus vite que ne le fait la lumière par le chemin usuel ;
- ils n'impliquent pas *a priori* la duplication des objets ou des personnes.

Téléportation par analyse-transmission-recomposition

À défaut d'emprunter des raccourcis topologiques, l'idée qui vient le plus naturellement à l'esprit pour obtenir un déplacement à la vitesse la plus grande possible est la suivante :

- analyser l'objet à téléporter ;
- envoyer, à l'aide d'ondes électriques ou électromagnétiques, la description obtenue de l'objet ;
- reconstituer l'objet à l'arrivée, à partir des données captées, avec des atomes rassemblés sur place (ceux qui composaient l'objet au point de départ y restent et ne voyagent pas, car les accélérer coûterait trop cher en énergie).

L'application de ce schéma engendre de multiples difficultés que nous allons envisager une à une. Remarquons que ce schéma est déjà mis en œuvre avec succès pour certains objets matériels simples et qu'il pourrait, sans effort

insurmontable, l'être pour d'autres. La téléportation est un télétransport authentique fondé sur le schéma *analyse-transmission-recomposition* : une feuille de papier recouverte de «taches» d'encre est analysée (avec un niveau de précision limitée), le résultat numériquement codé de l'analyse est transmis par le réseau téléphonique (donc à une vitesse proche de celle de la lumière), et l'appareil récepteur produit une feuille semblable à celle du départ, en exploitant l'information qui a voyagé.

Les télécopies sont souvent de médiocre qualité, mais c'est par souci d'économie et pour accélérer la transmission des informations sur la ligne téléphonique. Nous disposons de toutes les techniques nécessaires pour réaliser des fax en couleur de grande précision qui restitueraient l'épaisseur du papier et sa qualité. Sans grands efforts, on saurait de même téléporter des livres entiers. L'appareil émetteur ferait une analyse du format, de la nature de la reliure, de la couverture, des papiers, puis de chacune des feuilles, et, après transmission de toutes ces données, l'appareil récepteur réimprimerait et relierait un livre semblable ou approchant.

Est-ce qu'un tel appareil de télétransport de livres aurait un intérêt économique ? Sans doute pas, mais l'exemple est suffisant pour affirmer que la téléportation n'est pas de la science-fiction.

Jusqu'à où peut-on aller en suivant le schéma analyse-transmission-recomposition ? Pour les objets bidimensionnels, il est clair que les techniques de photographie associées à des techniques d'analyse de la nature des supports pourraient, si on le souhaitait et si on s'en donnait les moyens, conduire à des machines à téléporter des tissus, des rouleaux de papiers peints, des films de plastiques imprimés ou tout autre objet plat déformable. La qualité de l'objet reconstitué est limitée que par les efforts qu'on entreprend dans les phases d'analyse et de recomposition.

Certains objets tridimensionnels peuvent eux aussi, dès aujourd'hui, être téléportés d'un endroit quelconque de la terre à un autre par analyse-transmission-recomposition. C'est le cas des objets en plastique : ils peuvent être analysés par un laser qui en détermine la forme géométrique tridimensionnelle, forme qui est transmise à une machine laquelle reconstruit un objet identique à partir de la définition géométrique. Les machines de stéréolithographie créent

des copies de résines superposées qui matérialisent n'importe quelle forme préalablement analysée. De telles machines associées à un système de peinture automatisé seraient de parfaits terminaux d'arrivée pour la téléportation de petits objets tridimensionnels dont la composition interne est sans importance : petites statues, jouets pour enfant, figurines peintes, etc.

L'analyse chimique par spectrométrie de masse ou, dans le cas des séquences d'ADN, par électrophorèse sur gel, rend possible de téléporter des composés chimiques dont chaque molécule serait identifiée et dont les proportions respectives seraient mesurées ; l'ensemble de ces informations conduirait, après synthèse et mélange, à la reconstitution du composé initial.

De tels appareils ont pour l'instant des caractéristiques très limitées, mais ils sont d'actualité, et une équipe suisse dirigée par Denis Hochstrasser, de l'Institut suisse de bio-informatique, a conçu un scanner moléculaire destiné à l'analyse de protéines qui, en automatisant l'analyse de cette classe de molécules, fait faire un pas en avant à d'éventuels téléporteurs moléculaires.

Actuellement, seules des solutions liquides très pures d'un petit nombre de composants ou des mélanges solides très simples pourraient être ainsi moléculairement télétransportés, mais des progrès continus sont certains. D'ici peu, nous aurons donc la possibilité de construire de véritables machines à téléporter pouvant faire voyager des composés chimiques complexes.

L'ADN ou l'ARN de certains virus a été entièrement séquencé, et certains virus sont connus protéine par protéine ; nous pourrions donc, dans un proche avenir, téléporter certaines classes de petits organismes. Si nous partons à la conquête du système solaire ou de la galaxie, de telles machines pourraient devenir indispensables pour envoyer de nouveaux médicaments, de nouveaux aliments, de nouveaux colorants etc., à nos colonies éloignées.

Des limites infranchissables ?

Venons-en au problème des limites intrinsèques de l'approche de la téléportation par analyse-transmission-recomposition.

Plus un objet est complexe, plus sa téléportation exige qu'on l'analyse finement. Si, pour téléporter ce qui nous

intéresse dans une feuille de papier, point n'est besoin de mener l'analyse chimique de la feuille, en revanche, pour téléporter un gâteau au chocolat, il ne suffit pas de reconstituer un bout de plastique coloré en marron. Ce qui nous importe dans le gâteau est sa forme, sa couleur et son goût : le téléporter signifie donc reconstituer ces trois éléments, ce qui est bien sûr extrêmement difficile et hors de portée aujourd'hui, car le nombre de molécules d'un arôme de chocolat est énorme (plusieurs dizaines), et même en y prenant tout le temps qu'on veut les résultats actuels sont imparfaits.

La reconstitution de certains objets (comme les cristaux et les êtres vivants) oblige à une précision encore plus

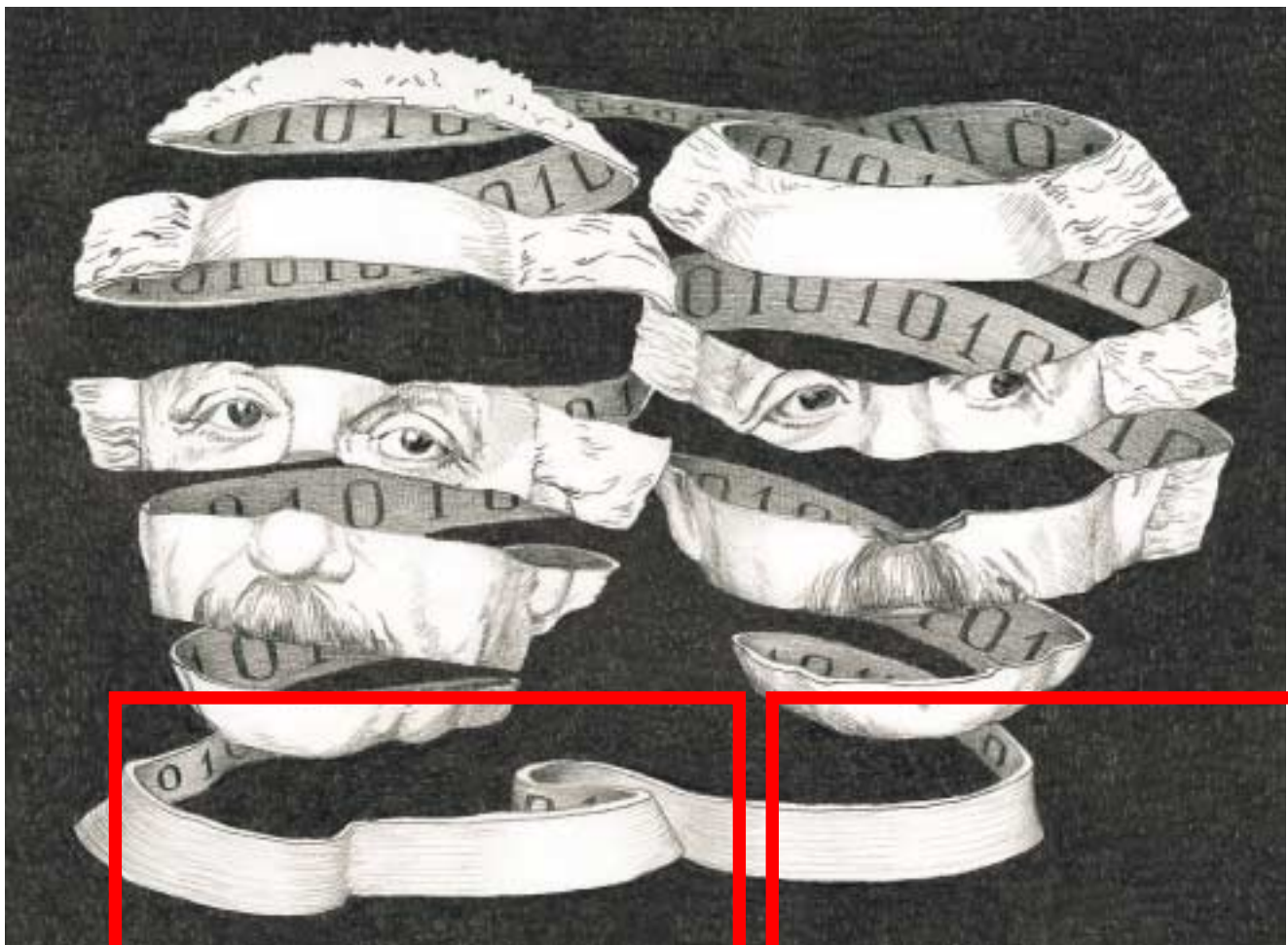
grande d'ordre atomique. En effet, le déplacement d'un atome peut correspondre à la mutation d'un gène important chez un être vivant : pour téléporter un être vivant, chaque molécule et chaque atome doit être identifié au départ et remplacé à l'arrivée avec exactitude.

Si l'on tente d'aller le plus loin possible dans la réalisation de téléporteurs, le moment arrivera donc vite où il faudra respecter la position exacte de chaque atome de l'objet à déplacer. Y a-t-il une impossibilité fondamentale à cette téléportation par analyse-transmission-recomposition avec une précision atomique? Nous entrons dans un domaine où il va être difficile de for-

muler de conclusions définitives. Cependant quelques commentaires méritent d'être notés.

Analyses impossibles?

Qui aurait pensé, il y a deux siècles, qu'on réussirait à voir les os ou les organes internes d'un animal vivant sans avoir à en découper la peau? Peut-être réussirons-nous à aller plus loin et à mener l'analyse, atome par atome, de petits volumes de matière. La mécanique quantique impose toutefois des limites à ce qu'on peut connaître des petits objets. Est-ce que ces limites concernent notre problème? Le physicien Samuel Braunstein (spécialiste de



1. QUANTITÉ D'INFORMATION POUR DÉCRIRE UN ÊTRE HUMAIN. Combien d'informations binaires (bits) faut-il pour décrire un être humain (qu'on voudrait téléporter en communiquant la description)? 10^{32} ? En indiquant la position, la nature et la vitesse de chaque atome composant un être humain avec une précision de l'ordre de grandeur d'un atome moyen, il faut environ 10^{32} bits d'information pour décrire un être humain. 10^{20} ? Les nombreuses informations redondantes que la description précédente contiendrait pourraient être considérablement réduites par les techniques de compression de données. Sans qu'aucun nombre puisse être avancé sur des bases sérieuses, on peut quand même risquer que 10^{20} bits seraient suffisants, surtout si l'on accepte de ne garder que les informations pertinentes (qu'importe, par exemple, la longueur exacte de chaque cheveu, la

position précise de chaque pore de la peau, etc.). 10^{15} ? Si l'on ne souhaite pas garder qu'une description algorithmique de l'esprit (et si une telle chose est possible!), le nombre d'informations caractérisant une personne serait sans doute bien inférieur à 10^{20} . On peut considérer que, vu la taille du génome (moins de 10^{10} bits d'information), vu le vocabulaire qu'une personne connaît (50 000 mots est exceptionnel, cela fait moins de 10^7 bits), vu le nombre de souvenirs qu'une personne possède (un livre de 100 000 pages permet certainement de les consigner tous, cela représente moins de 10^9 bits), on peut avancer que 10^{15} bits de programmes seraient grandement suffisants. Peut-être même pourrait-on risquer les nombres de 10^{12} ou 10^{10} . Bien sûr, la haute idée que l'homme a de lui-même rend choquantes de telles évaluations, que bien peu de gens acceptent.

2. La synthèse est-elle toujours possible ?



Le problème de la reconstitution d'objets dont on connaît le plan n'est pas toujours facile. Ne rencontrera-t-on jamais des molécules apparues grâce à des réactions utilisant des catalyseurs définitivement disparus ou inconnus ? Ne se peut-il pas aussi qu'une molécule n'apparaisse que dans des circonstances très particulières que nous ne reproduirons jamais (la synthèse du diamant, par exemple, exige de très fortes pressions), ou demandant des durées si longues que nous ne pourrions pas les réaliser ? Chacun de ces objets difficiles à synthétiser serait un obstacle majeur à la mise au point de la porte de sortie d'un téléporteur.

Le problème de la durée de la synthèse d'objets complexes pourrait bien être aussi un obstacle majeur à la téléportation. En informatique, la théorie de la complexité des algorithmes étudie des problèmes dont la solution ne peut pas être découverte en temps raisonnable (problèmes exponentiellement difficiles). Un voie pour démontrer définitivement l'impossibilité de la téléportation serait d'établir un lien entre ces problèmes et la synthèse de certains composés chimiques.

la téléportation quantique) s'est posée la question. La mécanique quantique indique que la précision avec laquelle on peut mesurer la position et la vitesse d'une particule est limitée par la formule d'Heisenberg, qui indique que le produit de l'incertitude sur la position par l'incertitude sur la vitesse est supérieure à la constante de Planck.

Si l'on souhaite mesurer chaque atome, d'hydrogène par exemple, de masse m avec une précision égale à la taille de l'atome, l'incertitude quant à la vitesse sera d'environ 300 mètres par seconde. Cela semble beaucoup, mais la vitesse v des atomes, due au seul fait que nous sommes à température ambiante T , donnée par $1/2mv^2 = kT$ (où k est la constante de Boltzmann), est plusieurs fois supérieure à cette vitesse. Il semble donc que le principe d'incertitude d'Heisenberg ne soit pas un obstacle à la réalisation d'un analyseur atome par atome servant pour la porte d'entrée d'un téléporteur du futur.

L'impossibilité d'un analyseur est peut-être à rechercher dans la logique géométrique des objets tridimensionnels. Certains objets de notre univers, pour des raisons mécaniques et géométriques, semblent en effet impos-

sibles à analyser : les banques utilisent par exemple des boîtes de transport de billets qui, en cas de tentative d'ouverture forcée, détruisent leur contenu (en répandant à l'intérieur un produit acide ou toxique). Une telle boîte dont la clef aurait été détruite ne constituerait-elle pas un objet à jamais impossible à analyser ? Et si ce type de boîte peut être ouverte par un expert, n'est-il pas possible d'en concevoir d'autres utilisant des explosifs et des serrures bloquantes dont la logique de la conception empêcherait définitivement toute analyse du contenu ? Je ne serais pas étonné que cette impossibilité structurelle se produise lorsqu'on a affaire à des molécules complexes imbriquées, c'est-à-dire formant des agrégats solides dont toute tentative d'analyse entraînerait la destruction (sans produire de résultats).

De tout cela, nous concluons qu'un analyseur atomique universel (qui produirait une description atomique de tout système physique qu'on lui confierait) n'existera sans doute jamais. Toutefois, cela reste à démontrer, et il est certain que l'analyse atomique de bien des objets progressera au-delà de ce que nous savons faire pour l'instant.

Quantité d'information trop importante ?

On a évalué la quantité d'information nécessaire pour décrire un objet de la taille d'un être humain, et l'on en a parfois conclu que la téléportation humaine est à jamais impossible. La quantité d'information à transmettre par le signal électrique ou électromagnétique dépasserait toujours tout ce que nous saurions stocker et communiquer. Examinons ces arguments qui pourraient régler par la négative une fois pour toutes le problème de la téléportation par la méthode d'analyse atomique.

L'institut américain de la santé, pour son projet de « L'homme visible » (*The visible human project*), utilise environ 10^{11} bits (d'informations 0 ou 1) de données qui servent au stockage des détails au millimètre près, en trois dimensions, d'un être humain (un cadavre congelé qui a été découpé en fines tranches). Ces 10^{11} bits d'information sont loin de constituer une définition complète, atome par atome, du pauvre homme (un condamné à mort exécuté par injection mortelle au Texas). En fait, on évalue que la description atome par atome d'un être humain demanderait environ 10^{32} bits d'information, ce qui, en transcrivant cette information sur des CD-ROM, en fournirait une quantité suffisante pour remplir un cube de 1 000 kilomètres de côté !

On peut espérer prochainement transmettre 10^{12} bits d'information par seconde, ce peut être un jour ira-t-on jusqu'à 10^{15} , or, même à cette vitesse de transmission, il faudra 10^{17} secondes (environ trois milliards d'années) pour transmettre les données relatives à un seul individu décrit atome par atome. Même si je suis prêt à accorder que jamais on ne saura transmettre 10^{32} informations binaires dans un délai raisonnable (ni sans doute les mémoriser), je crois que cet argument contre la téléportation n'est pas recevable, car il oublie la possibilité de compresser les données.

La compression de données est déjà utilisée par les fax (c'est ce qui explique que, lorsque vous passez une feuille presque blanche, elle est transmise bien plus rapidement que lorsque vous passez une feuille couverte d'un texte en petits caractères). La compression des données est ce qui rend possible la superposition sur une même onde radio de plusieurs canaux de télévision numérique. Cette technique, presque totalement ignorée il y a vingt ans, est devenue

tentez de lire la polarisation d'un photon, vous n'obtiendrez qu'une information partielle, votre mesure ayant par ailleurs l'effet de détruire définitivement l'état quantique initial, qu'il sera alors totalement impossible de connaître.

Le schéma analyse-transmission-reconstruction ne peut pas être envisagé si l'on prend en compte l'état quantique des photons, des atomes ou objets qu'on cherche à téléporter. Si l'état mental d'un cerveau demande une précision quantique, alors la situation est définitivement compromise, et aucun appareil de téléportation n'existera jamais : ceux fondés sur une recombinaison atome par atome ayant le malheureux effet de ne reconstruire qu'un fantôme inerte de l'individu placé dans la machine d'entrée.

Face à cet argument, certaines réponses sont possibles.

D'abord, même si, pour téléporter un humain, il faut aussi téléporter les états quantiques du cerveau, états par principe inconnaissables, cela n'interdit pourtant pas d'en envisager la téléportation. En effet, Charles Bennett, Gilles Brassard et quelques autres physiciens et informaticiens spécialistes de l'information quantique ont proposé en 1993 un schéma de téléportation d'un état quantique inconnu par utilisation d'une paire de photons corrélés. Leur méthode permet, sans en prendre connaissance (ce qui de toute façon est impossible), de téléporter des états quantiques (voir l'article qui suit sur la téléportation quantique).

Les propriétés de cette téléportation quantique, que plusieurs équipes ont su réaliser expérimentalement il y a deux ans, sont :

- l'état quantique est nécessairement détruit en son point de départ ;
- l'état quantique téléporté est toujours resté inconnu ; ni Jean ni Claude n'ont jamais disposé d'information suffisante pour l'identifier ;
- le voyage s'est fait, au mieux, à la vitesse de la lumière, car Jean a dû transmettre à Claude le résultat de sa manipulation par un canal classique.

Cette théorie ouvre la voie à la téléportation d'états quantiques qui, si on réussit à aller plus loin, pourrait conduire à la téléportation de cerveaux humains entiers, avec non seulement un niveau de détail atomique, mais quantique.

Même si vous pensez que la description atome par atome de votre cerveau n'est pas suffisante pour capter

la totalité de votre identité mentale et si vous soutenez que, pour télétransporter un cerveau, il faut aussi reproduire à l'arrivée l'ensemble des états quantiques du cerveau (atomes, molécules, groupes de molécules), rien n'indique qu'on ne pourra pas y parvenir.

Si cette téléportation quantique est mise en œuvre, le problème de la duplication ne se posera pas, car elle est impossible : il n'y aura jamais duplication de humains transportés, ce qui évitera les délicats problèmes juridiques, éthiques et fiscaux évoqués plus haut.

Sarua Braunstein, face à la question de savoir si, pour décrire un cerveau, on peut s'arrêter au niveau atomique ou s'il faut prendre en compte la nature quantique du cerveau, évoque un argument intéressant. Des gens vont quotidiennement dans des hôpitaux subir des scanners à résonance magnétique nucléaire. Or ces examens altèrent les états quantiques d'un très grand nombre d'atomes des personnes qui les subissent. Cela ne semble avoir aucun effet ni sur leur état mental, ni sur leur état de santé et conduit donc à l'idée que le fonctionnement d'un cerveau pourrait bien être décrit (et téléporté) sans qu'on ait à se préoccuper des états quantiques de ses composants. Le niveau atomique serait en définitive suffisant. L'argument de Braunstein renforce notre optimisme.

L'esprit algorithmique

Certains chercheurs en intelligence artificielle vont bien plus loin et pensent – sans rien démontrer et en profond désaccord avec d'autres spécialistes des sciences cognitives – que le fonctionnement de l'esprit humain pourrait être simulé sans qu'on ait besoin de descendre au niveau atomique.

L'esprit d'une personne serait équivalent à un ensemble de programmes informatiques, et, une fois qu'on les aurait copiés, la téléportation deviendrait facile, puisqu'il y aurait juste à communiquer les programmes et à les remplacer dans un ordinateur receptacle (équipé des moyens de déplacement et d'organes de vision sans doute) pour que l'esprit se remette à fonctionner. Cette fois sans doute, aucun problème de compression ne se poserait, car avec 10^{12} bits de programmes on peut imaginer que l'essentiel d'un esprit humain serait capté.

Ce nombre de 10^{12} apparaît faible à certains. Il me semble pourtant déjà

énorme, car il faut réaliser que cela représente l'équivalent d'une bibliothèque de cent mille livres de deux cents pages : personnellement, je serais content de savoir que ma description algorithmique nécessite dix mille livres de deux cents pages (10^{11} bits d'information), ou même mille livres de deux cents pages (10^{10} bits d'information).

Bien sûr, rien aujourd'hui n'indique que nous réussirons à saisir les définitions algorithmiques des êtres humains pour les téléporter et les dupliquer dans les P.C. du futur. On ne sait même pas bien sûr, si vraiment il existe quelque chose de cette nature : c'est là un débat philosophique qui risque d'occuper de nombreux philosophes encore durant le troisième millénaire.

Tout est possible !

Parmi les quatre voies possibles pour construire un système de téléportation : téléportation par raccourcis topologiques ; téléportation par communication de la description atomique ; téléportation par communication de la description quantique ; téléportation par communication de la description algorithmique, aucune ne semble entièrement impossible en l'état actuel des connaissances (même si aucune n'est prouvée réalisable!). Nous pouvons donc rêver prendre dans quelque temps un bain sur une plage des Caraïbes dès la sortie du bureau, le vendredi soir.

S. BRAUNSTEIN, *A Fun Talk on Teleportation*, <http://www.sees.bangor.ac.uk/~schmuel/tporthtml>

C. CRÉPEAU, *Téléportation quantique*, <http://www.cs.mcgill.ca/~crepeau/tele.html>

C.H. BENNETT, G. BRASSARD, C. CRÉPEAU, R. JOZSA, A. PERES et W. WOOTTERS, *Teleporting an Unknown Quantum State by Dual Classical and EPR Channels*, in *Physical Review Letter*, n° 70, pp. 1895-1898, 1993.

J.-P. DELABAYE, *Les lois nouvelles de l'informatique quantique*, in *Pour La Science*, pp. 66-72, août 1998.

L.M. KRAUSS, *La physique de Star Trek ou Comment visiter l'univers en pyjama*, Bayard Éditions, Paris, 1998 (traduction de *The Physics of Star Trek*, Basic Book, 1995).

T. SIEGFRIED, *The Bit and the Pendulum : From Quantum Computing to M Theory, The Physics of Information*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1999.

La téléportation quantique

ANTON ZEILINGER

La possibilité de transporter instantanément un objet d'un endroit à un autre, rêvée par la science-fiction, est aujourd'hui réalité... au moins pour les particules lumineuses.

Les œuvres de science-fiction abondent en variantes d'une scène type : un groupe d'intrépides explorateurs entre dans un silo fourmillant d'appareils électroniques ; après quelques effets spéciaux sonores et lumineux, nos héros disparaissent et réapparaissent à la surface d'une lointaine planète. Ce phénomène est la téléportation, autrement dit la possibilité de voyager d'un endroit à un autre sans devoir ingérer les rations alimentaires des compagnies aériennes. Bien que la téléportation de gros objets ou de personnes reste un rêve, la téléportation quantique est au laboratoire une réalité pour les particules lumineuses, ou photons.

La téléportation quantique met en jeu certains des caractéristiques remarquables de la mécanique quantique, branche de la physique développée dans le premier quart du XX^e siècle pour expliquer le comportement de la matière à l'échelle atomique. Dès sa création, les physiciens ont compris que les règles de la mécanique quantique conduisaient à des phénomènes nouveaux dont certains heurtent le sens commun. Grâce aux avancées technologiques du dernier quart du XX^e siècle, les chercheurs ont réalisé de nombreuses expériences qui prouvent les étrangetés de la mécanique quantique : les chercheurs exploitent ces caractéristiques pour concevoir ce qui semblait impossible, par exemple la téléportation quantique.

Dans les scénarios de science-fiction, la téléportation permet des déplacements instantanés et viole donc la

limite de vitesse imposée par la théorie de la relativité d'Albert Einstein, qui stipule que rien ne peut voyager plus vite que la lumière.

Les modalités de la téléportation diffèrent, mais l'idée est en général celle qui a été exposée dans l'article précédent. Un dispositif scanne l'objet initial. Un transmetteur envoie l'information à la station de réception qui l'utilise pour réaliser une copie conforme de l'original. Dans certains cas, la matière qui compose l'original est également transportée jusqu'à la station de réception, par exemple sous forme d'«énergie» ; dans d'autres avatars du principe, la réplique est constituée d'atomes et de molécules présents dans la station de réception.

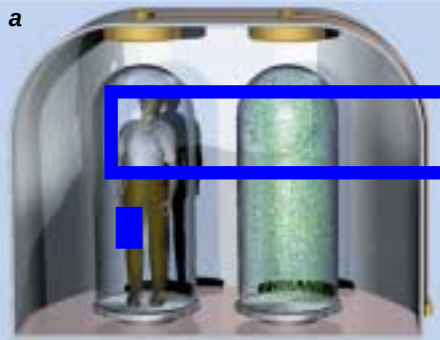
À priori, la mécanique quantique semble interdire un tel système de téléportation. Le principe d'incertitude d'Heisenberg énonce qu'on ne peut connaître simultanément la position d'un objet et sa quantité de mouvement. Par conséquent, on ne peut pas faire de balayage parfait de l'objet à téléporter : la position ou la vitesse de chaque atome et électron seraient susceptibles d'être faussées. Le principe d'incertitude d'Heisenberg s'applique également à d'autres paires de mesures physiques : il est par conséquent impossible de mesurer avec certitude l'état quantique total d'un objet, alors que ces mesures seraient nécessaires pour décrire l'original avec l'exactitude voulue (dans *Star Trek*, le «Compensateur d'Heisenberg» résout miraculeusement ce problème).

En 1993, une équipe de physiciens a renversé cette idée communément admise, en utilisant la mécanique quantique elle-même pour faire de la téléportation. Les chercheurs de cette équipe (Charles Bennett, de la Société IBM ; Gilles Brassard, Claude Crépeau et Richard Josza, de l'Université de Montréal ; Asher Peres, de l'Institut de technologie Technion, en Israël, et William Wootters, de Williams College) ont découvert qu'un des aspects fondamentaux de la mécanique quantique, l'intrication, permettrait sans le violer, de contourner les limites imposées par le principe d'incertitude d'Heisenberg.

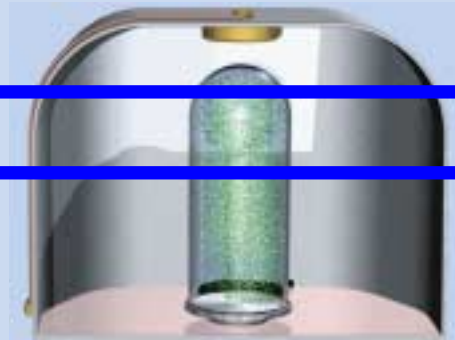
L'intrication

Nous sommes en 2100. Un de vos amis physicien, qui aime animer les soirées avec des tours de passe-passe, vous apporte une série de paires de dés. Il vous demande de les jeter une paire après l'autre. Vous gardez un souvenir cuisant du mini-trou noir de Noël dernier et vous manipulez la première paire avec une extrême précaution. Finalement, vous vous risquez à la lancer, et vous obtenez un double 3. Vous jetez alors la deuxième paire : double 6. Enfin la suivante : double 1. Toujours des doubles.

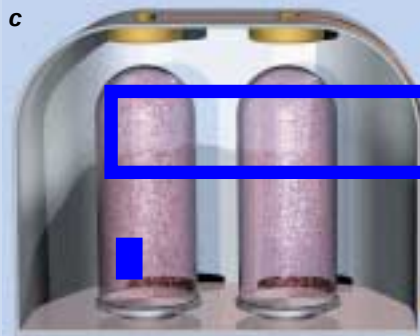
Les dés de cette fabuleuse composition sont comme des particules quantiques «intriquées». Chaque dé pris séparément est aléatoire et non truqué, mais son double intriqué donne toujours le même résultat que le premier. Un tel comportement a été mis en évidence



b



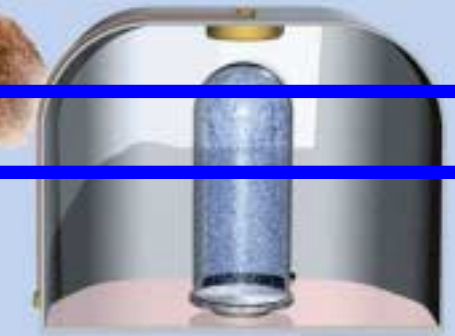
La téléportation commencerait ainsi : la personne se trouve dans une enceinte à scanner (a), à côté d'une enceinte identique remplie d'une masse égale de particules (en vert). Les particules auxiliaires ont été au préalable intriquées quantiquement avec leurs partenaires situées dans une lointaine station de réception (b).



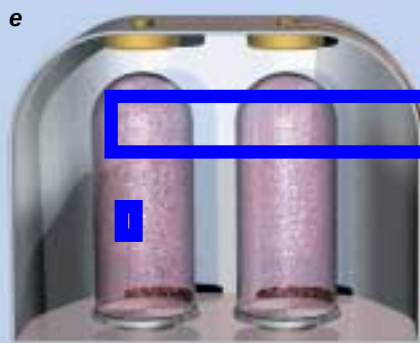
d



e



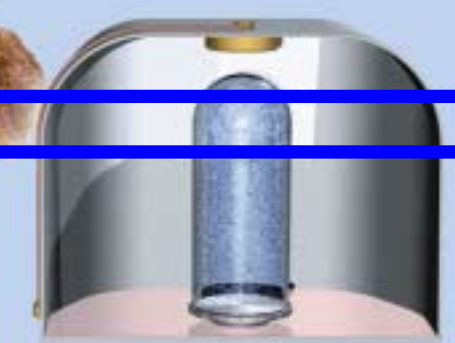
Une mesure conjointe des particules auxiliaires et de toutes les particules qui composent la personne (c) les place dans un état quantique aléatoire et produit une masse de données aléatoires (mais significatives) de deux éléments binaires par état élémentaire. La mesure détermine instantanément les états quantiques des particules associées situées à grande distance (d).



f



g



Les données de la mesure sont envoyées à la lointaine station de réception par des moyens conventionnels (e). La durée de cette étape est limitée par la vitesse de la lumière (f), ce qui rend impossible la téléportation à une vitesse supérieure.

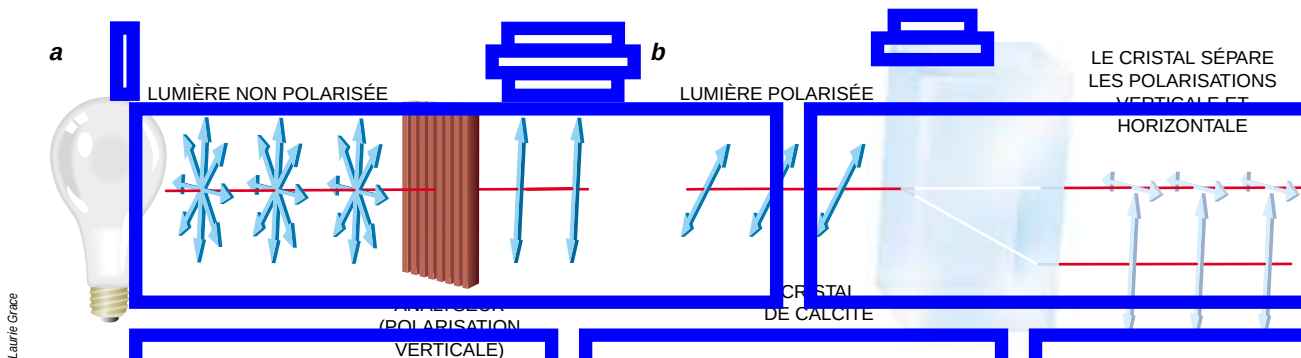


h



Le récepteur du message recrée le voyageur avec une exactitude qui va jusqu'à l'état quantique de chaque particule (g), en ajustant l'état des particules associées grâce aux données de mesures aléatoires en provenance de la station de scanning.

David Fierstein



1. LA LUMIÈRE EST À LA FOIS UNE PARTICULE, LE PHOTON, et une onde électromagnétique. La direction de vibration du champ électrique de l'onde électromagnétique est dénommée sa polarisation. La lumière non polarisée est constituée de photons dont le champ électrique, perpendiculaire à la direction de propagation, est aléatoire (a). Dans la lumière polarisée, les oscillations du champ électrique (flèches) sont alignées. Un cristal de calcite (b) divise un faisceau lumineux en deux faisceaux parallèles ; dans un des fais-

ceaux la polarisation est parallèle à l'axe du cristal, dans l'autre faisceau la polarisation est perpendiculaire à cet axe. Les photons entrant avec une polarisation intermédiaire sont dans une superposition quantique des deux polarisations ; chacun de ces photons peut être détecté dans l'un ou l'autre faisceau de photons, la probabilité de détection dépendant de l'angle définissant la polarisation. Comme elle fait intervenir des probabilités, la polarisation d'un photon unique dans un état intermédiaire ne peut être connue avec certitude.

pour des particules intriquées réelles : des paires d'atomes, d'ions ou de photons tiennent lieu de dés, et les différentes faces de chaque dé sont remplacées par des propriétés telles que la polarisation.

Prenons deux photons dont les polarisations sont liées de sorte qu'elles ne sont plus aléatoires, mais identiques. Les faisceaux lumineux, de même que les photons isolés, sont constitués des oscillations de champs électromagnétiques, et la polarisation correspond à la direction d'oscillation du champ électrique (voir la figure 1). Supposons que Claude soit en possession d'un des photons intriqués et que Jean ait son photon partenaire. Quand Claude mesure la polarisation de son photon pour déterminer si elle est horizontale ou verticale, la probabilité de chaque événement est de 50 pour cent. Pour le photon de Jean, la probabilité est la même, mais l'intrication garantit que le résultat de Jean sera le même que celui de Claude. Dès que Claude obtient le résultat «polarisation horizontale», par exemple, elle peut être sûre que la polarisation du photon de Jean sera également horizontale. Avant que Claude n'effectue sa mesure, les deux photons n'ont pas de polarisation individuelle ; l'état intriqué spécifie seulement qu'une mesure trouvera que les deux polarisations sont égales.

Cette propriété est fascinante, car la distance qui sépare Claude et Jean n'entre pas en ligne de compte ; la propriété est vérifiée tant que l'intrication de leurs photons est préservée. Claude peut se trouver sur Alpha du Centaure et Jean sur la Terre, leurs résultats concorderont quand ils les

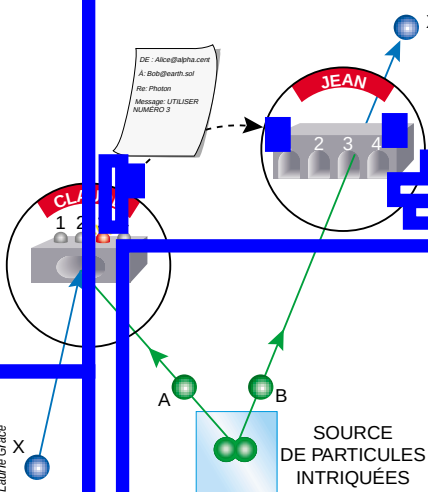
compareront. Tout se passe comme si la mesure du photon de Claude influait magiquement sur le photon de Jean, et vice versa.

Vous vous demandez peut-être si l'on peut expliquer l'intrication en imaginant que des instructions sont inscrites dans chaque particule. Peut-être, en intriquant les particules, synchronisons-nous un mécanisme caché qui détermine les résultats qu'elles donneront au moment de la mesure. Cela expliquerait l'influence

mystérieuse de la mesure de Claude sur la particule de Jean. Dans les années 1950, le physicien irlandais John Bell a démontré un théorème qui établit que, dans certaines situations, ces explications de l'intrication quantique par des «variables cachées» produiraient des résultats différents de ceux qui avaient été prédits par la mécanique quantique classique. Les expériences ont confirmé la validité de la mécanique quantique et exclu cette possibilité de variables cachées.

Le physicien autrichien Erwin Schrödinger, l'un des cofondateurs de la mécanique quantique, considérait l'intrication comme l'«aspect essentiel» de la physique quantique. L'intrication est le sujet du paradoxe EPR, acronyme des physiciens Albert Einstein, Boris Podolski et Nathan Rosen, qui analysèrent en 1935 les effets à grande distance de l'intrication. Einstein en parlait comme d'une «action à distance étrange à vous faire froid dans le dos». Si l'on tentait d'expliquer les résultats du paradoxe par des signaux entre les photons, ces signaux devraient se déplacer plus vite que la lumière... Hérésie!

Malheureusement pour les télécommunications, heureusement pour la physique, les règles quantiques s'opposent à cette violation du droit relativiste. La mesure locale d'un photon produit un résultat complètement aléatoire et ne porte donc aucune information concernant le photon éloigné. Elle vous indique seulement les probabilités de chaque résultat possible de mesure à distance. Néanmoins, on peut utiliser astucieusement l'intrication pour faire de la téléportation quantique.



2. DANS LA TÉLÉPORTATION quantique idéale, l'expéditeur, Claude, et le destinataire, Jean, ont chacun un photon d'une paire de photons intriqués A et B (en vert). Claude a aussi une particule X, dans un état quantique inconnu (en bleu). Claude effectue une mesure d'états de Bell des particules A et X : quatre résultats sont possibles. Elle informe Jean de son résultat par des moyens ordinaires. En fonction du résultat obtenu par Claude, Jean laisse sa particule telle quelle (1) ou la place par rotation dans un des états 2, 3 ou 4. Dans tous les cas, Jean obtient une copie exacte de la particule X d'origine.

Les photons intriqués au travail

Claude et Jean anticipent leur besoin futur de téléporter un photon et se munissent chacun d'un photon d'une paire intriquée *AB*; Claude prend le photon *A* et Jean le photon *B*. Chacun conserve soigneusement son photon sans mesurer son état, sans troubler le fragile état d'intrication (voir la figure 3).

Arrivé le moment où Claude souhaite téléporter vers Jean un troisième photon, que nous dénommerons le photon *X*. Claude ne sait pas dans quel état ce photon *X* se trouve, mais elle veut que le photon obtenu par Jean ait la même polarisation. Elle ne peut pas se contenter de mesurer la polarisation du photon *X* et d'envoyer le résultat à Jean, car, en général le résultat de la mesure ne sera pas identique à l'état initial du photon. Par exemple le photon peut être polarisé selon une direction oblique inconnue. Si Claude dispose son cristal d'analyse avec des axes horizontaux et verticaux (voir la figure 1), elle obtiendra la réponse oui ou non à la question «le photon après l'analyseur a-t-il une polarisation horizontale?», mais elle ne sera pas capable de remonter à la direction oblique inconnue. Cette impossibilité est une conséquence directe du principe d'Heisenberg.

Au lieu de cela, afin de téléporter le photon *X*, Claude le mesure «conjointement» au photon *A*, sans déterminer

leur polarisation individuelle. Par exemple, Claude détermine que leurs polarisations sont «perpendiculaires» (mais elle ignore toujours les polarisations absolues de l'un comme de l'autre). La mesure conjointe du photon *A* et du photon *X* est dénommée mesure de l'état de Bell. La mesure de Claude engendre un effet subtil : elle modifie le photon de Jean de telle sorte qu'il soit corrélé avec une combinaison du résultat de la mesure et de l'état initial du photon *X*. Le photon de Jean est maintenant porteur de l'état du photon *X* de Claude soit exactement, soit modifié de façon élémentaire.

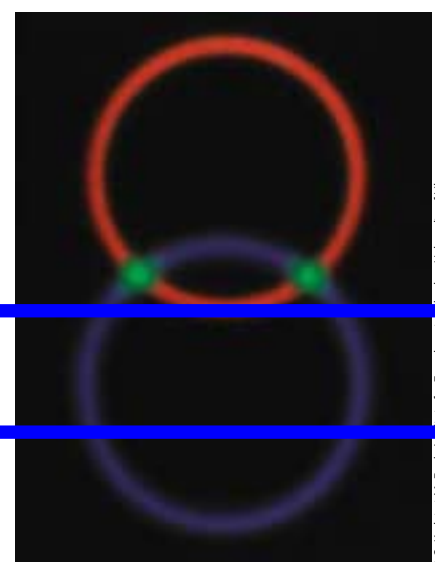
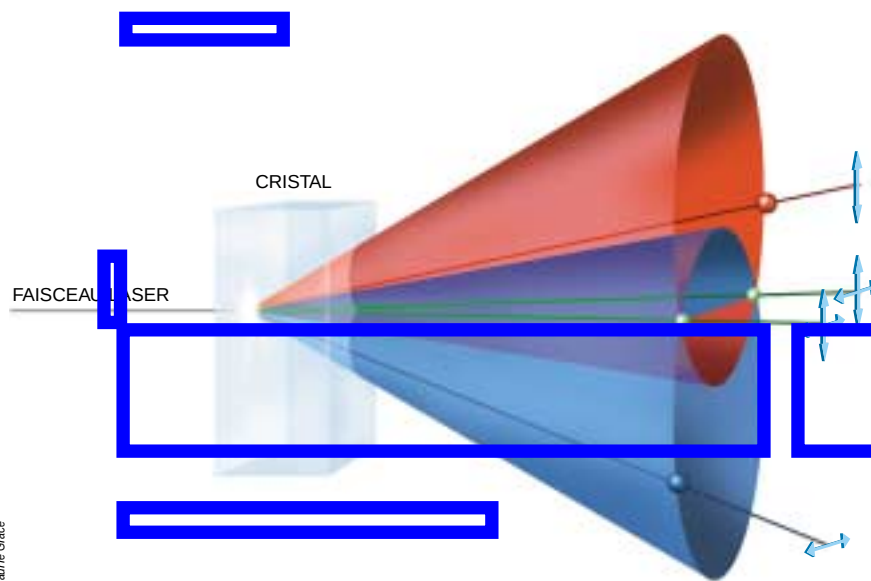
Pour achever la téléportation, Claude doit faire parvenir à Jean un message par des moyens conventionnels comme un appel téléphonique ou une note écrite. Après avoir reçu ce message, Jean peut, si nécessaire, transformer son photon *B* de telle sorte qu'il soit une copie conforme du photon *X* initial. La transformation que Jean devra lui faire subir dépend du résultat de la mesure de Claude. Typiquement, une des transformations que Jean devra éventuellement faire subir à son photon est une rotation de sa polarisation de 90 degrés, ce qui peut être obtenu en lui faisant traverser un cristal ayant les propriétés optiques adéquates.

Il y a quatre possibilités (quatre états de Bell) correspondant aux quatre relations quantiques possibles entre les photons *A* et *X*. Deux de ces relations sont «totalement» parallèles ou perpendi-

culaires, ce qui veut dire que la relation est valable quelle que soit la direction selon laquelle on effectue les mesures de polarisation. Pour les deux autres relations, le résultat (parallèle ou perpendiculaire) est différent selon que la polarisation des photons est mesurée selon l' verticale ou l'horizontale, ou l'une des deux diagonales à 45 degrés.

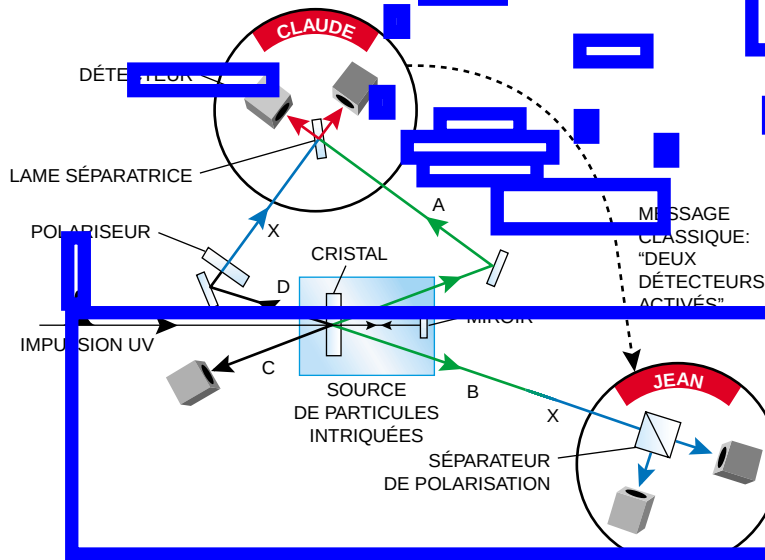
Le résultat obtenu par Claude parmi les quatre résultats possibles est complètement aléatoire et indépendant de l'état d'origine du photon *X* ; Jean ne sait donc pas quel traitement faire subir à son photon tant qu'il ne connaît pas le résultat de la mesure de Claude. Voilà donc pourquoi, afin de finaliser la téléportation, Claude doit envoyer un message ordinaire à Jean. On peut dire que le photon de Jean contient instantanément toute l'information contenue dans l'original de Claude, transportée jusqu'à lui par la mécanique quantique, mais, pour être capable de lire cette information, Jean doit attendre une autre information de type classique, qui est constituée de deux éléments ne pouvant se déplacer plus vite que la lumière.

Les sceptiques peuvent argumenter que seul l'état de polarisation du photon ou, plus généralement, son état quantique, est téléporté, et non pas le photon «lui-même». Mais, étant donné que l'état quantique d'un photon le définit de manière univoque, le fait de téléporter son état est parfaitement équivalent à la téléportation de la particule elle-même.



3. LES PAIRES DE PHOTONS INTRIKUÉS sont créées par un faisceau laser qui traverse un cristal (le borate de baryum, par exemple). Le cristal convertit un photon ultraviolet en deux photons de moindre énergie, l'un polarisé verticalement (sur le cône rouge), l'autre horizontalement (sur le cône bleu). Si les photons se propa-

gent le long de l'intersection des cônes (en vert), il est impossible de connaître *a priori* la polarisation de chacun, mais ils sont intriqués. La mesure de la polarisation de l'un détermine celle de l'autre, qui lui est perpendiculaire. L'image à droite est une photographie (en fausses couleurs) de la lumière obtenue par fluorescence.



Laurie Grace

4. L'EXPÉRIENCE D'INNSBRUCK utilise une impulsion de lumière ultraviolette qui, en se propageant dans le cristal, cette impulsion produit la paire de photons intriqués A et B, qui vont respectivement vers Claude et vers Jean. L'impulsion, réfléchie par un miroir, retransverse le cristal et crée deux autres photons, C et D. Un polariseur impose au photon D un état donné X. Le photon C est détecté, ce qui confirme que le photon X a été envoyé à Claude. Claude combine les photons A et X avec une lame séparatrice de faisceau (voir la figure 5). S'il détecte un photon dans chaque détecteur (comme c'est le cas 25 pour cent du temps), la téléportation est un succès, et par l'intermédiaire d'un message classique elle en avertit Jean, qui utilise un séparateur de polarisation pour vérifier que son photon a acquis la polarisation de X.

Pas de clonage

Notons que la téléportation ne donne pas deux exemplaires du photon X. Nous pouvons copier une information classique autant de fois que nous le souhaitons, mais la copie de l'information quantique est impossible ; on doit ce résultat au « théorème de non-clonage », à William Wootters et Wojciech Zurek du Laboratoire de Los Alamos, qui ont prouvé, en 1982, que si l'on pouvait cloner un état quantique, on pourrait utiliser les clones

pour violer le principe d'Heisenberg. La mesure de Claude intrique son photon A avec le photon X, et le photon X « oublie » en quelque sorte son état d'origine. En tant que composant d'une paire intriquée, il n'a pas d'état de polarisation propre. Ainsi, l'état original du photon X n'appartient plus au domaine de Claude.

De plus, l'état du photon X est transféré à Jean sans que ni lui ni Claude sache quel est cet état. Le résultat de la mesure de Claude, complètement aléatoire, ne les renseigne en rien sur

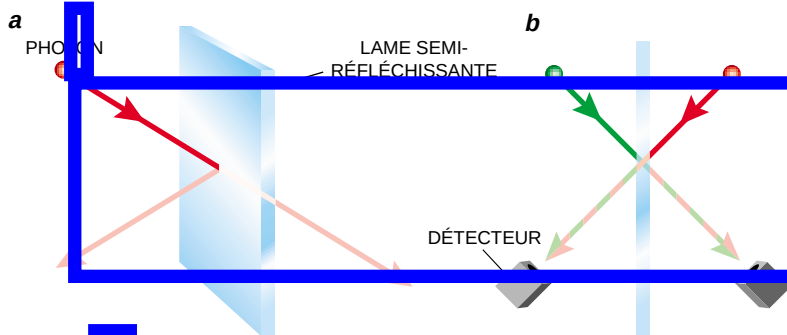
cet état. C'est ainsi que cette procédure contourne le principe d'incertitude d'Heisenberg, qui empêche de déterminer l'état quantique complet d'une particule, mais qui n'interdit pas de téléporter cet état, à condition qu'on ne tente pas de le connaître !

Par ailleurs, il n'y a pas de déplacement matériel de l'information quantique téléportée entre Claude et Jean. Toute la chose qui se déplace matériellement est le message concernant le résultat de la mesure de Claude, qui indique à Jean quelle modification apporter à son photon, mais ne contient aucune information sur l'état du photon X lui-même.

Une fois sur quatre, Claude a de la chance en faisant sa mesure (la relation entre A et X est identique à l'intrication originale de A et B), et le photon de Jean devient immédiatement la copie conforme de l'original de Claude. On pourrait alors se dire que l'information a voyagé instantanément de Claude à Jean, dépassant la vitesse limite de la lumière. Mais cette particularité ne peut servir à envoyer de l'information, car Jean n'a aucun moyen de savoir que son photon est déjà une copie conforme. Ce n'est qu'en apprenant le résultat de la mesure d'état de Bell par Claude, transmis jusqu'à lui par des moyens classiques, qu'il peut exploiter l'information de l'état quantique téléporté. S'il essaie de deviner dans quels cas la téléportation a marché instantanément, il se trompera dans 75 pour cent des cas, et quand il aura deviné juste, il ne le saura pas. S'il utilise ces photons sur la base de ses prédictions, les résultats seront les mêmes que s'il avait pris des photons de polarisation aléatoire. Einstein avait raison : même l'étrange action instantanée à distance de la mécanique quantique est impuissante à envoyer de l'information exploitable plus vite que la lumière.

Construction d'un téléporteur

Nous pourrions penser que le schéma théorique que nous venons d'examiner nous permettrait de construire aisément un téléporteur : il n'en est rien. Le défi expérimental est immense. La production de paires de photons intriqués ne présente plus de difficultés depuis une dizaine d'années, mais on n'avait jamais auparavant effectué la mesure d'état de Bell sur deux photons indépendants.



Laurie Grace

5. LA LAME SEMI-RÉFLÉCHISSANTE (a) réfléchit la moitié de la lumière qui l'atteint et transmet l'autre moitié. Un photon donné a une chance sur deux d'être réfléchi, et une chance sur deux d'être transmis. Si deux photons identiques arrivent sur la séparatrice de faisceau en même temps, un de chaque côté (b), les parties réfléchies et transmises interfèrent, et les photons perdent leur caractère distinct. On détecte alors un photon dans chaque détecteur 25 pour cent du temps, mais il est alors impossible de dire si les deux photons ont été transmis ou s'ils ont tous deux été réfléchis. Seule une propriété relative (ils sont allés vers des détecteurs différents) est mesurée.

Un dispositif efficace (voir la figure 3) pour produire des paires de photons intriqués est un oscillateur paramétrique optique : en traversant un cristal spécifique, un photon unique engendre deux photons qui sont intriqués (ici, dont les polarisations sont perpendiculaires).

Il est beaucoup plus difficile d'intriquer deux photons indépendants déjà existants, comme il est nécessaire de le faire dans un analyseur d'état de Bell, car cela implique que les deux photons (A et X) perdent leurs caractéristiques propres. En 1997, notre groupe de recherche (Dik Bouwmeester, Jian-Wei Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl et Harald Weinfurter), travaillant à l'Université d'Innsbruck, a résolu ce problème dans le cadre de notre expérience de téléportation (voir la figure 4). Dans notre expérience, une brève impulsion de lumière ultraviolette produite par un laser traverse un cristal et crée les photons intriqués A et B. L'un des photons, A, est envoyé vers Claude et le second vers Jean. Un miroir renvoie l'impulsion ultraviolette à travers le cristal, ou elle crée une autre paire de photons, C et D (ceux-ci sont également intriqués, mais nous

n'utilisons pas leur intrication). Le photon C atteint un détecteur, qui nous avertit que son partenaire D est prêt à être téléporté. Le photon D passe à travers un polariseur, que nous pouvons orienter de toutes les manières imaginables. Le photon polarisé obtenu est notre photon X, celui que nous voulons téléporter, et il est envoyé vers Claude. Après avoir traversé le polariseur, X est un photon indépendant, il n'est plus intriqué. Et même si nous savons quelle est sa polarisation, puisque nous avons réglé le polariseur, Claude ne la connaît pas. Nous réutilisons la même impulsion ultraviolette pour nous assurer que Claude a les photons A et X en même temps.

Nous devons alors mesurer des états de Bell : pour cela, Claude combine ses deux photons (A et X) en utilisant un miroir semi-réfléchissant, c'est-à-dire un dispositif ayant une couche très mince et transrécive d'argenture, de telle sorte que la lumière frappe à 50 pour cent de chances de la traverser et 50 pour cent de chances d'être réfléchi. En termes quantiques, le photon est une superposition de ces deux possibilités (voir la figure 5).

Supposons maintenant que les deux photons qui arrivent sur le miroir viennent de directions opposées, leurs trajectoires étant alignées de façon que le rayon réfléchi de l'un corresponde au rayon transmis de l'autre, et *vice versa*. Un détecteur attend au bout de chaque rayon. L'ordinaire, les deux photons sont réfléchis indépendamment, et ils ont une chance sur deux d'arriver dans des détecteurs différents. Cependant, si les photons sont impossibles à distinguer et atteignent le miroir au même instant, ils interfèrent quantiquement : certaines configurations s'annulent et ne se réalisent pas, tandis que d'autres se renforcent et sont plus fréquentes. Quand les photons interfèrent, leur probabilité de finir dans des détecteurs différents n'est plus que de 25 pour cent. De plus, ce cas de figure correspond à un état de

Bell des deux photons bien particulier parmi les quatre possibles : c'est celui que Claude obtenait précédemment quand elle avait «de la chance». Le reste du temps (75 pour cent des cas), les deux photons arrivent au même détecteur, ce qui correspond aux trois autres états de Bell, sans toutefois permettre de déterminer auquel on a affaire.

Les ordinateurs quantiques

L'application la plus concrète de la téléportation quantique en dehors de la recherche en physique fondamentale est sans doute l'informatique quantique. Un ordinateur classique fonctionne avec des éléments binaires, qui prennent une valeur définie, soit 0, soit 1 ; un ordinateur quantique utilise des bits quantiques, ou *qubit*. Les *qubits* peuvent être dans des superpositions quantiques de 0 et de 1, comme un photon peut être dans une superposition de polarisations horizontale et verticale. En envoyant un seul photon, le téléporteur quantique de base transmet un unique *qubit*.

L'idée d'une superposition de nombres peut sembler étrange, mais, comme le disait Rolf Landauer, d'IBM, «quand nous étions petits et que nous apprenions à compter sur nos doigts classiques et très collants, nous étions bien loin de la mécanique quantique et de la superposition. Nos doigts bien distincts nous donnaient une mauvaise intuition. Nous pensions que nous pouvions lever trois doigts, puis quatre. Nous ne comprenions pas qu'il était possible d'avoir une superposition des deux possibilités».

Un ordinateur quantique travaille simultanément sur de nombreuses entrées différentes. Par exemple, il pourrait faire tourner un algorithme simultanément sur un million d'entrées, en utilisant un nombre limité de qubits, équivalant au nombre d'éléments binaires qu'un ordinateur classique utiliserait pour faire tourner cet algorithme une fois sur une seule entrée. Les théoriciens ont prouvé que les algorithmes tournant sur des ordinateurs quantiques peuvent résoudre certains problèmes plus vite (c'est-à-dire en moins d'itérations) que tous les algorithmes connus tournant sur un ordinateur classique. Parmi ces problèmes, citons la recherche d'éléments dans une base de données, et la factorisation des grands nombres utile pour le codage et le décodage.

Pour l'instant, seuls les composants les plus rudimentaires des futurs ordinateurs quantiques ont été fabriqués : des portes logiques pouvant traiter un ou deux qubits. La mise au point d'un ordinateur quantique, même de faible capacité, est encore éloignée. L'un des problèmes clés est le transfert fiable des données entre différentes portes logiques ou processeurs, au sein d'un ordinateur quantique isolé ou sur un réseau quantique. La téléportation quantique constitue une solution.

En outre, Daniel Gottesman de Microsoft et Isaac Chuang d'IBM ont récemment démontré qu'on pouvait construire un ordinateur généraliste à partir de trois composants de base : des particules intriquées, des téléporteurs quantiques et des portes agissant sur un seul *qubit* à la fois. Ce résultat est important, car les portes à un *qubit* sont technologiquement beaucoup plus accessibles que les portes à deux qubits. L'astuce pour construire une porte à deux qubits à partir d'un téléporteur consiste à téléporter deux *qubits* de l'entrée de la porte à sa sortie, en utilisant des paires intriquées soigneusement adaptées. Les paires intriquées sont modifiées de sorte que la sortie de la porte reçoive les *qubits* traités comme il convient. La mise en œuvre de la logique quantique arbitraire revient alors à préparer des états intriqués prédéfinis et à les téléporter. Il faut cependant admettre que la mesure de l'état de Bell complet, nécessaire pour la téléportation, est une sorte de traitement à deux *qubits*.



Quand Claude détecte simultanément un photon dans chaque détecteur, le photon de Jean devient instantanément une copie du photon d'origine X de Claude. Nous avons vérifié expérimentalement que cette téléportation avait bien lieu en montrant que le photon de Jean avait la polarisation que nous avions imposée au photon X. Notre expérience n'était pas parfaite, mais la bonne polarisation a été détectée dans 80 pour cent des cas (s'il s'agissait de photons polarisés, on obtiendrait 50 pour cent de bonnes polarisations). Nous avons démontré l'efficacité de la procédure pour des polarisations variées : verticales, horizontales, linéaires à 45 degrés, et même pour un type de polarisation non linéaire, la polarisation circulaire.

L'aspect le plus délicat du réglage de notre analyse d'état de Bell consiste à rendre les photons A et X impossibles à distinguer. Même le moment d'arrivée des photons pourrait servir à les identifier, et il est par conséquent important d'«effacer» les informations temporelles portées par les particules. Dans notre expérience, nous utilisons une astuce que nous a suggérée Marek Zukowski, de l'Université de Gdansk : nous faisons passer les photons au travers de fibres de longueur d'onde à très faible largeur de bande. Cette étape rend les longueurs d'onde des photons très précises et, en vertu du principe d'incertitude d'Heisenberg, cela étale l'incertitude sur les temps d'arrivée des photons.

États de superposition

Cette expérience a démontré sans équivoque la téléportation, mais avec un faible taux de succès. Du fait que nous ne pouvions identifier qu'un seul des états de Bell, nous ne pouvions téléporter le photon de Claude que dans les cas où cet état particulier se produisait, soit 25 pour cent du temps. Il n'existe pas d'analyseur d'état de Bell complet pour les photons indépendants, ou pour deux particules quantiques créées indépendamment, si bien que, pour l'instant, il n'y a aucun dispositif ayant fait ses preuves qui aurait 100 pour cent d'efficacité.

En 1994, Sandu Popescu, alors à l'Université de Cambridge, a proposé une méthode pour contourner le problème. Il a suggéré que l'état à téléporter pouvait être un état quantique «à cheval» sur le photon auxiliaire A

Le coin des sceptiques

N'est-il pas exagéré d'appeler ce phénomène «téléportation»? Après tout, il ne s'agit que de téléporter un état quantique, pas un objet réel. Cette question en soulève une autre, plus philosophique, sur le concept d'«identité». Comment savons-nous qu'un objet, par exemple la voiture que nous trouvons dans notre garage le matin est la même que celui que nous avons vu un moment auparavant? La physique quantique confirme cette approche : des particules de même type dans le même état quantique sont impossibles à distinguer, même en principe. Si l'on pouvait soigneusement échanger tous les atomes de fer de la voiture et les remplacer par des atomes de fer venant d'un bloc de minerai, et reproduire l'état de chaque atome exactement, le résultat final serait absolument la même voiture que la voiture initiale. L'identité ne peut être définie autrement : c'est le fait d'être semblable en toutes propriétés.

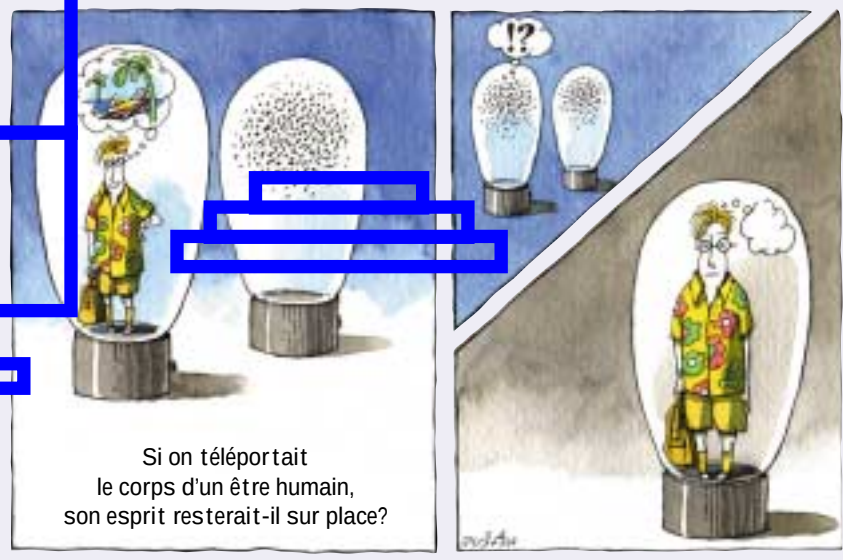
N'aurait-on pas plutôt parler de «téléfax quantique»? Le téléfax produit une copie distincte de l'original, alors qu'il est impossible de distinguer un objet téléporté, même en principe. De plus, dans la téléportation quantique, l'original est détruit.

Y a-t-il un espoir réel de téléporter des objets complexes? Il y a de nombreux obstacles sérieux. Tout d'abord, l'objet doit se trouver dans un état quantique pur, et ces états sont très fragiles. Les photons interagissent très peu avec l'air, et nos expériences ont donc pu être faites à l'air libre, mais les expériences concernant des atomes ou des objets plus gros doivent être réalisées dans le vide pour éviter les collisions avec les molécules de gaz. Par ailleurs, plus un objet est gros, plus son état quantique est facilement perturbé. Le rayonnement thermique des naris de l'année dernière suffit à lui seul à perturber un minuscule bloc de matière. C'est pour cela que nous n'observons pas d'effets quantiques dans notre vie quotidienne.

L'interférence est plus facile à produire que l'intrication ou la téléportation. Elle a été mise en évidence pour des fullerènes, des sphères constituées de 60 atomes de carbone. Ces travaux vont s'étendre à des objets plus gros, peut-être même à de petits virus, mais ne vous attendez pas à ce que ces prouesses techniques soient reproduites avec des ballons de foot!

La mesure d'état de Bell est un autre problème. Quelle serait la signification d'une mesure d'état de Bell d'un virus constitué de 10^7 atomes, par exemple?

Une précision quantique est-elle nécessaire pour téléporter une personne? Le fait d'être dans le même état quantique ne semble pas être nécessaire pour rester la même personne. Nous changeons d'état tout le temps sans pour autant devenir d'autres personnes (c'est en tout cas l'impression que nous en avons!). Inversement, les vrais jumeaux et les clones biologiques ne sont pas les «mêmes êtres», parce que le contenu de leur mémoire est différent. Le principe d'incertitude d'Heisenberg nous empêche-t-il de répliquer une personne avec suffisamment de précision pour qu'elle pense qu'elle est toujours la même personne? Nul ne le sait. Mais il est intéressant de remarquer que le théorème de non-clonage quantique nous interdit de faire la copie conforme d'une personne.



de Claude. Le groupe de recherche de Francesco De Martini, de l'Université de Rome «La Sapienza», a expérimenté avec succès cette méthode en 1997. La paire auxiliaire de photons était intriquée en fonction des positions des photons : le faisceau engendrant le photon A était coupé en deux par une lame séparatrice et envoyé vers deux parties différentes du dispositif de Claude, les deux alternatives étant liées par intrication à une découpe similaire du photon B de Jean. L'état à téléporter était également porté par le photon A de Claude (ici, son état de polarisation). Avec un seul photon jouant les deux rôles, la détection des quatre états de Bell possibles devient une simple mesure standard à une particule : il ne s'agit plus que de détecter le photon de Claude dans un des deux lieux possibles, avec une des deux polarisations possibles. L'inconvénient de ce dispositif tient à ce que, si l'on donnait à Claude un état X inconnu et distinct à téléporter, il faudrait qu'elle transfère cet état à la polarisation de son photon A.

La polarisation d'un photon, caractéristique qui a fait l'objet de la téléportation dans les expériences d'Innsbruck et de Rome, est une quantité discrète, en ce sens que tout état de polarisation est une superposition de seulement deux états discrets, les polarisations horizontale et verticale. Le champ électromagnétique associé à la lumière présente également des caractéristiques continues qui peuvent être décrites comme la superposition d'un nombre infini d'états élémentaires. Par exemple, un faisceau lumineux peut être «comprimé», ce qui signifie qu'on peut obtenir une très grande précision ou absence de bruit pour une de ses caractéristiques, mais au détriment de la précision d'une autre caractéristique (toujours Heisenberg). En 1998, le groupe de recherche de Jeffrey Kimble, à l'Institut de technologie de Californie, a téléporté un tel état comprimé d'un faisceau lumineux à un autre, mettant ainsi en évidence le phénomène de téléportation appliqué à une variable continue.

Ces expériences, aussi remarquables soient-elles, n'ont pas résolu le problème de la téléportation quantique de gros objets, qui se heurte à deux difficultés majeures. Tout d'abord, il faut une paire intriquée d'objets de la même sorte. Par ailleurs, l'objet à téléporter et les paires intriquées doivent être suffisamment isolées de leur environnement. En cas

de fuite d'information de l'environnement ou vers l'environnement par des interactions isolées, les états quantiques des objets se dégradent : ce processus est la décohérence. On imagine mal comment parvenir à isoler ainsi totalement un gros appareillage, et encore moins une créature vivante qui respire de l'air et qui rayonne de la chaleur. Mais qui peut prédire la rapidité des progrès scientifiques à venir?

Nous pourrions certainement utiliser les technologies existantes pour téléporter des états élémentaires, comme ceux des photons dans nos expériences, sur des distances de quelques kilomètres, peut-être même jusqu'à des satellites. La technologie de téléportation d'états d'atomes individuels est aujourd'hui accessible : le groupe de recherche de Serge Haroche, à l'École normale supérieure de Paris, a mis en évidence l'intrication d'atomes. On peut raisonnablement s'attendre à observer l'intrication de molécules et à réaliser leur téléportation d'ici une dizaine d'années.

Il est probable que la téléportation sera d'abord utilisée dans le domaine de l'informatique quantique, où la notion ordinaire d'élément binaire (les 0 et les 1) est généralisée à des bits quantiques ou *qubits*, qui sont des superpositions et des intrications de 0 et de 1. La téléportation pourrait servir à transférer de l'information quantique entre des processeurs quantiques. Les téléporteurs quantiques pourraient servir d'éléments de base à la construction d'un ordinateur quantique. La bande dessinée de la page 41 illustre une situation intéressante où la combinaison de la téléportation et de l'informatique quantique présente un avantage : tout se passe pratiquement comme si on avait reçu l'information téléportée instantanément, sans avoir à attendre qu'elle arrive par les voies normales.

Le débat Bohr-Einstein

La mécanique quantique est certainement l'une des théories physiques les plus élaborées et les plus surprenantes. Les problèmes qu'elle pose à notre intuition du monde lui a valu d'être sévèrement critiquée par Einstein. Ce dernier soutenait que la physique devait essayer de décrire la réalité indépendamment de son observation, mais il réalisait néanmoins que nous sommes confrontés à des problèmes inextricables dès que nous essayons de coller une telle réalité phy-

sique aux membres d'une paire intriquée. Son illustre collègue, le physicien danois Niels Bohr, insistait sur la nécessité de prendre en compte le système entier (dans le cas d'une paire intriquée, l'ensemble formé par les deux particules). Ce que préconisait Einstein, à savoir la description de l'état réel indépendant de chaque particule, est dépourvu de sens dans le cas d'un système quantique intriqué.

La téléportation quantique descend directement des expériences de pensée dévotement par Einstein et Bohr. Quand nous analysons l'expérience, nous nous heurterions à toutes sortes de problèmes si nous commencions à nous interroger sur la nature et sur les propriétés des particules individuelles intriquées. Nous devons analyser avec prudence la signification du terme «avoir une polarisation». Nous sommes nécessairement amenés à conclure que les seules choses que nous pouvons examiner sont des résultats expérimentaux obtenus à l'aide de mesures. Dans notre mesure de polarisation, le signal du détecteur nous permet de construire une image mentale où le photon «avait» effectivement une polarisation donnée à l'instant de la mesure. Mais nous ne devons pas perdre de vue que cela est une vue de l'esprit. Elle n'est valable que si nous parlons de cette expérience en particulier, et il ne faut pas la transposer à la légère à une autre situation.

En reprenant la pensée de Bohr, je dirais que nous comprenons la mécanique quantique si nous réalisons que la science ne décrit pas la nature telle qu'elle est, mais exprime plutôt ce que nous pouvons en dire. Aujourd'hui, la principale utilité des expériences de physique fondamentale telles que la téléportation est de nous aider à mieux comprendre notre monde quantique.

Anton ZEILINGER travaille à l'Institut de physique expérimentale de Vienne.

Charles H. BENNETT, *Quantum Information and Computation*, in *Physics Today*, vol. 48, n° 10, pp. 24-31, octobre 1995.

D. BOUMMESTER, J.W. PAN, N. BRATTLE, M. EIBL, H. WEINFURTER et A. ZEILINGER, *Experimental Quantum Teleportation*, in *Nature*, vol. 393, pp. 570-575, 11 décembre 1997.

Quantum Information, numéro spécial de *Physics World*, vol. 11, n° 3, mars 1998.

A.J. LEGGETT, *Quantum Theory : Weird and Wonderful*, in *Physics World*, vol. 12, n° 12, pp. 73-77, décembre 1999.

L'alimentation des prédateurs marins

YVES CHEREL • CHRISTOPHE GUINET • HENRI WEIMERSKIRCH

Adaptés à des conditions extrêmes, les oiseaux et les mammifères marins plongent à des centaines de mètres de profondeur et parcourent des milliers de kilomètres à la recherche de nourriture. Des appareils électroniques miniatures ont mesuré leurs performances insoupçonnées.

1. LES MANCHOTS ROYAUX des îles Crozet se regroupent en colonies au moment de la reproduction.

Les ailes de géant déployées, un grand albatros quitte son nid pour un voyage alimentaire qui durera quatre semaines pendant lesquelles il parcourra plus de 15 000 kilomètres avant de relayer son partenaire, resté pour couvrir, dans l'archipel Crozet au Sud de l'océan Indien. À quelques centaines de kilomètres, des manchots royaux adultes plongent en apnée pendant cinq minutes jusqu'à 300 mètres de profondeur pour rapporter de la nourriture à leurs poussins.

Le suivi de ces performances exceptionnelles n'est possible que depuis une dizaine d'années, grâce à la miniaturisation et au perfectionnement d'appareils électroniques devenus suffisamment légers et peu encombrants pour être fixés sur les oiseaux et les mammifères marins : les stratégies alimentaires des albatros, des manchots, des phoques et des otaries sont pour la première fois mesurables. Où vont les prédateurs marins pour se nourrir ? Que mangent-ils ? Comment pêchent-ils ? Nous pouvons aujourd'hui répondre à ces questions et les résultats obtenus montrent que nous avons sous-

estimé les capacités de ces animaux.

Grâce au soutien logistique et financier de l'Institut français pour la recherche et la technologie polaires de Brest, nous étudions les prédateurs marins des Terres australes et antarctiques françaises (les îles Crozet, Kerguelen, Saint-Paul et Amsterdam, ainsi que la Terre Adélie, sur le continent antarctique) situées dans l'océan Indien (voir la figure 2). Sur ces terres préservées, d'importantes colonies de prédateurs se reproduisent : leur grande taille, leur caractère peu farouche et l'accessibilité des colonies ont fait de certains d'entre eux des modèles de choix pour l'étude des stratégies d'alimentation des oiseaux et mammifères marins.

Des oiseaux long-courriers

Les oiseaux marins ne reviennent à terre que pour se reproduire ; ils passent donc l'essentiel de leur vie loin des côtes, en dehors de leur cycle reproducteur ou pendant celui-ci, entre deux relais d'incubation ou de garde des poussins. Les derniers

modèles de balises Argos pèsent environ 20 grammes : ils permettent aujourd'hui le suivi des déplacements en mer d'oiseaux de taille moyenne dont la masse corporelle est de l'ordre du kilogramme. Chaque balise émet un signal spécifique reconnu par des satellites qui transmettent les informations au centre de Toulouse. Celui-ci transmet à son tour l'information aux laboratoires de recherche en France, environ une heure après avoir localisé l'animal : on visualise ainsi jour après jour les voyages alimentaires de chaque individu sur un écran d'ordinateur.

Nos travaux sur les pétrels à menton blanc (*Procellaria aequinoctialis*) nichant à Crozet révèlent l'étendue de la surface océanique exploitée par les oiseaux : pendant l'incubation, c'est-à-dire à la fin du printemps, les adultes prospectent les eaux subtropicales jusqu'aux côtes de l'Afrique du Sud, à 3 500 kilomètres au Nord-Ouest de leur lieu de nidification. En revanche, pendant la période d'élevage du poussin, en été, ces oiseaux alternent des voyages alimentaires courts et longs : les premiers sont favorables au poussin, qui



est souvent nourri, mais défavorables aux adultes, qui consomment leurs réserves énergétiques ; celles-ci sont restaurées au cours des voyages longs (voir la figure 6). Les pétrels à menton blanc capturent des poissons sur le plateau de Crozet pendant les trajets courts, et pêchent, pendant les trajets longs, du krill antarctique (des bancs de petits crustacés de l'espèce *Euphausia superba*) que le retrait progressif de la glace de mer rend accessible à des milliers de kilomètres au Sud. Ces différentes manières d'une même espèce d'exploiter l'environnement marin illustrent le compromis adaptatif entre l'investissement parental et la condition physique, donc la survie, des adultes reproducteurs.

Lors de leurs voyages alimentaires, les albatros, les pétrels et les manchots effectuent soit des trajets directs vers un endroit précis où ils passent l'essentiel de leur temps avant de retourner rapidement à la colonie, soit des trajets en boucle qui ne privilégient aucune zone particulière. Ils utilisent pré-

férentiellement les endroits de forte productivité marine tels que les bords des plateaux continentaux et les fronts océaniques. Lors de leurs déplacements, les oiseaux tiennent également compte de la météo et de l'horlogerie. Les grands albatros (*Diomedea exulans*) de Crozet volent le plus souvent par vent arrière ou trois quarts arrière. Ils parcourent ainsi jusqu'à plus de 500 kilomètres par jour sans dépenser beaucoup d'énergie. Les albatros sont également sensibles au nyctémère, c'est-à-dire à l'alternance du jour et de la nuit. Ils volent surtout le jour et les nuits de pleine lune, et profitent de nuits sombres pour se reposer.

Un appétit d'oiseau

Le suivi satellitaire nous indique le trajet des oiseaux, mais ne nous renseigne pas sur les rythmes d'alimentation et sur les quantités de proies ingérées. Rory Wilson, de l'Institut d'océanographie de Kiel, a mis au point des capteurs électroniques qui enregistrent la température de l'estomac (voir la figure 4). Les oiseaux sont homéothermes, c'est-à-dire que la température de leur corps est maintenue constante quelles que soient les conditions extérieures, alors que leurs proies, hétérothermes, sont à la température de l'eau de mer dans laquelle elles vivent. Ainsi, à chaque ingestion de proies, la température stomacale du prédateur diminue. La durée

du retour à la température initiale est proportionnelle à la masse des proies : grâce à la mesure de cette température stomacale on détermine la quantité de nourriture ingérée.

Fixés à une patte, d'autres capteurs d'activité indiquent quand l'oiseau est posé ou en vol, et la température des masses d'eau prospectées. Toutefois, à la différence des balises Argos, ces appareils stockent les données dans une mémoire électronique sans les transmettre. L'animal équipé doit donc être recapturé et la mémoire de l'appareil transmise à celle d'un ordinateur pour obtenir les informations enregistrées.

Avec, d'une part, ses trois mètres d'envergure pour une masse corporelle de huit à douze kilogrammes et, d'autre part, sa docilité, le grand albatros est l'animal le plus étudié à ce jour. Cette espèce se nourrit d'organismes de grande taille dont on mesure facilement le nombre et la masse. Pendant les trajets en boucle de plusieurs milliers de kilomètres au-dessus des eaux océaniques, les albatros capturent une quarantaine de proies, soit 10 à 15 kilogrammes ingérés (environ deux à trois kilogrammes par jour). En moyenne, ils restent 60 pour cent de leur temps en vol et se nourrissent majoritairement pendant la journée.

Les remarquables performances des oiseaux et des mammifères marins dépendent de leurs facultés de localisation et de capture des proies. Quel est le menu de ces prédateurs ? Deux écueils limitent sa détermination : d'une part, le retour des animaux à terre uniquement pour la reproduction restreint la collecte directe des proies à cette période de l'année ; d'autre part, les éléments recueillis, tels les contenus stomacaux ou les fèces, sont digérés. L'identification des proies n'est alors possible que par l'analyse des restes résistants à la digestion, tels les otolithes (des petites concrétions de calcaire logées dans l'oreille interne qui participent, chez les vertébrés au sens de l'équilibre), les squelettes des poissons osseux, les béc cornés des céphalopodes et les carapaces des crustacés (voir la figure 3).

L'essentiel de l'alimentation des oiseaux et mammifères marins est constitué de poissons, de calmars et de crustacés. Autour du continent antarctique, le krill est la proie privilégiée des prédateurs, cependant, nous avons mis en évidence l'importance d'autres organismes dans le réseau alimentaire autour des archipels de Cro-



2. LES TERRES AUSTRALES ET ANTARCTIQUES FRANÇAISES, composées de la Terre-Adélie sur le continent antarctique, ainsi que des îles Crozet, Kerguelen, Amsterdam et Saint-Paul, abritent de nombreuses colonies de prédateurs marins tels les albatros.

zet et Kerguelen : ce réseau est dominé par d'autres espèces d'euphausiacés, par le crustacé amphipode *Themisto gaudichaudii* et par les poissons-lanternes (ces poissons océaniques de la famille des myxodinorhynchidés émettent de la lumière par des organes nommés photophores disposés le long de leur corps). Ces derniers, dont l'importance n'est reconnue que depuis une dizaine d'années, constituent environ le tiers des cinq millions de tonnes de ressources marines consommées annuellement par les communautés d'oiseaux et de mammifères des îles Crozet et Kerguelen.

Nous avons également montré que les grands albatros exploitent une ressource originale de l'océan Austral : les calmars adultes de la famille des *Onychoteuthidae*, qui meurent après s'être reproduits ; moins denses que l'eau, ils remontent alors progressivement à la surface et deviennent ainsi accessibles aux albatros. Le suivi satellitaire a montré qu'une zone où les oiseaux concentrent leur activité de recherche alimentaire, sur le bord Sud-Est du plateau qui entoure l'archipel Crozet, est une zone de reproduction privilégiée de ces calmars.

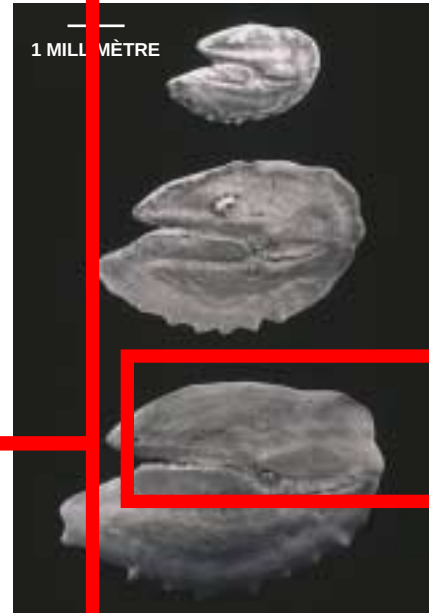
Des plongeurs émérites

Alors que les albatros et les pétrels se nourrissent en surface, les manchots, les pingouins, les cormorans et les mammifères marins plongent pour capturer leurs proies. Leur comportement de pêche échappe ainsi à l'observation visuelle, et les rares données disponibles émanaient d'individus pris

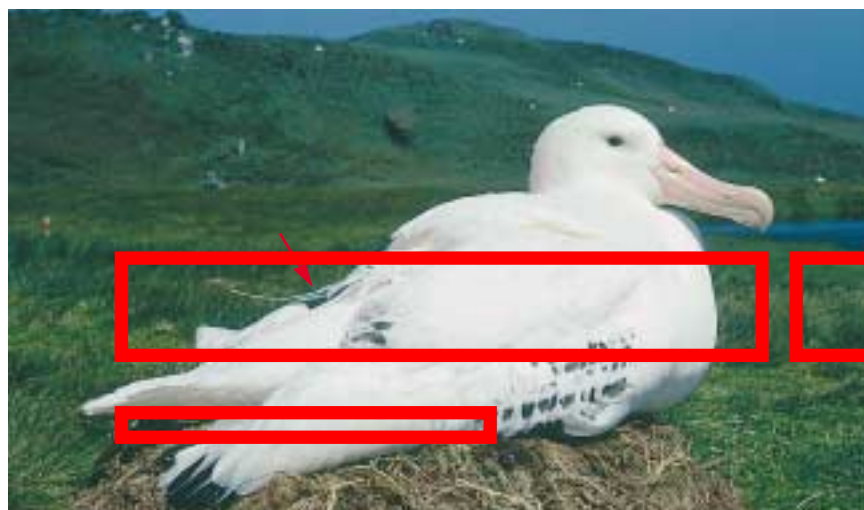
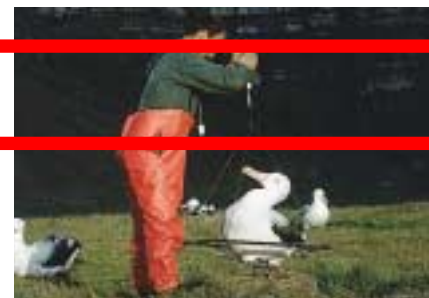
dans des filets ou, pour les cachalots, dans des câbles sous-marins.

Dans les années 1980, Gerald Kooyman, de l'Institut océanographique Scripps de San Diego, a mis au point et utilisé des enregistreurs électroniques de plongée pour les phoques et pour les otaries puis pour les manchots. Ces appareils sont dotés d'un capteur de pression qui indique la profondeur et, parfois, d'une turbine qui mesure la vitesse de nage des animaux. Les enregistreurs sont le plus souvent collés sur le dos des oiseaux et des mammifères marins qu'ils doivent être recapturés afin de récupérer les appareils : ces derniers livrent alors des informations telles que la profondeur de chaque plongée, sa durée, le temps de récupération en surface et les vitesses descendante et ascendante. Plus la fréquence d'acquisition des données est élevée, plus les caractéristiques des plongées sont définies avec précision.

Yann Tremblay, du Centre d'études biologiques de Chizé, a ainsi mis en évidence deux nouveaux types de comportement alimentaire chez les manchots : d'une part, les plongées synchrones de plusieurs individus indiquant qu'ils sont capables de chasser en groupe et, ainsi, de coopérer pour optimiser la capture de proies (voir *Les manchots*, par Yann Tremblay et Yves Cherel, rubrique « Perspectives scientifiques », *Pour la Science*, octobre 1998) ; d'autre part, ces oiseaux effectuent aussi bien des plongées pélagiques, en pleine eau, que des plongées benthiques, c'est-à-dire juste au-dessus du fond.

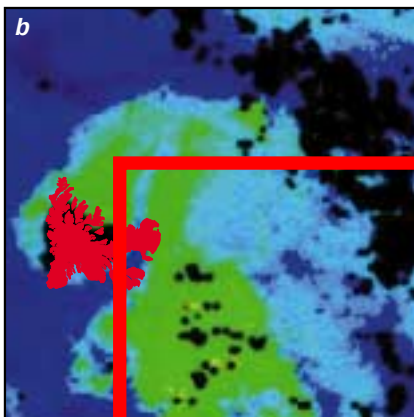
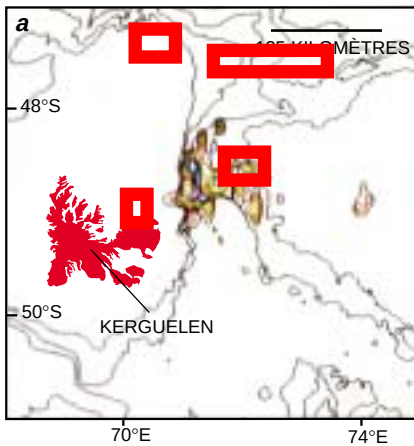


3. LES OTOLITHES sont des petites concrétions calcaires, qui, dans l'oreille interne, participent du sens de l'équilibre. Ils résistent à la digestion et renseignent sur le régime alimentaire des prédateurs marins dont on analyse le contenu de l'estomac.



4. LES GRANDS ALBATROS se prêtent de bonne grâce à l'étude de leurs stratégies alimentaires : ils sont suivis en vol grâce à des balises Argos (flèche à gauche) fixées sur leur plumage (à droite, en haut). De plus, des sondes stomacales enregistrent le moment de l'ingestion

et la quantité de proies avalées. Pour s'assurer de la présence de ces sondes stomacales qui sont parfois régurgitées, on utilise un détecteur de métal (à droite, au centre). L'état nutritionnel de ces oiseaux est suivi par des pesées régulières (à droite, en bas).



5. LES SITES DE PÊCHE des otaries à fourrure (en haut) ont été identifiés à l'aide de balises Argos et d'enregistreurs de plongée (les lignes de couleurs indiquent, du rouge vers le bleu, la densité croissante de ces animaux). L'imagerie satellitaire (en bas) montre qu'ils choisissent des zones riches en chlorophylle (en vert) dues à la présence de plancton végétal : celui-ci est ingéré par le plancton animal que capture les poissons-lanternes myctophidés, les proies favorites des otaries.



6. LES PÉTRELS À MENTON BLANC (a), qui nichent sur l'archipel de Crozet, adoptent des trajets alimentaires différents selon que leurs œufs ont éclos ou non : lors de l'incubation, ils prospectent les eaux au large de l'Afrique du Sud, alors que pendant l'élevage du poussin, ils alternent les trajets courts, favorables au poussin, autour de l'archipel et les trajets longs vers le Sud, pour reconstituer leurs réserves énergétiques (b).

Les capacités de plongée des oiseaux et des mammifères marins ont été largement sous-estimées. Par exemple, le manchot empereur (*Aptenodytes forsteri*), la plus grande espèce de manchots, plonge couramment à 400 mètres de profondeur pendant quatre à cinq minutes. Les meilleures performances connues sont celles des deux espèces d'éléphants de mer qui se reproduisent en Californie (*Mirounga angustirostris*) et dans l'Océan austral (*Mirounga leonina*) : lors de voyages alimentaires qui durent plusieurs mois, ces phocides passent plus de 90 pour cent de leur temps submergés, et ne remontent à la surface que pour respirer. Ils effectuent en moyenne 2,5 plongées par heure, entre 250 et 600 mètres de profondeur, pendant 15 à 40 minutes, et le temps moyen passé en surface entre deux plongées est seulement de deux minutes.

L'équipe de Burney Le Boeuf, de l'Université de Californie à Santa Cruz, a montré que les deux sexes de l'espèce Nord-Américaine prospectent des zones différentes et très éloignées des îles où ils se reproduisent : les mâles migrent de la Californie en remontant vers le Nord le long du talus continental jusqu'aux îles Aléoutiennes, où ils effectuent majoritairement des plongées benéfiques. En revanche, les femelles plongent au-dessus des grands fonds, dans des zones très étendues du nord de l'océan Pacifique.

Les difficultés techniques et logistiques liées au mode de vie exclusivement marin ont limité les travaux sur

Toutefois, une étude canadienne a révélé les capacités de deux baleines à bec : ces hyperoodons boréaux (*Hyperoodon ampullatus*) plongent régulièrement dans un canyon sous-marin à plus

de 800 mètres de profondeur et atteignent 1 450 mètres lors d'une plongée de 70 minutes ; ces animaux ont des habitudes de plongée supérieures à celles des cachalots qui s'alimentent en routine « seulement » de 400 à 600 mètres de profondeur.

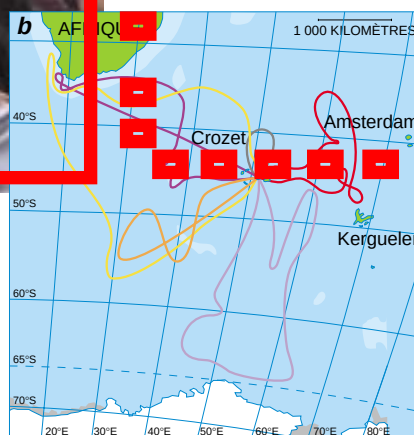
Par ailleurs, la mise au point de systèmes vidéo miniaturisés nous renseigne également sur l'écologie des prédateurs marins. Par exemple, les éléphants de mer, les dauphins et les phoques arrêtent de nager lorsqu'ils atteignent une certaine profondeur, et continuent alors la descente passivement pendant le reste de la plongée : ils réduisent ainsi leur dépense énergétique. Les images vidéo ont également détaillé un comportement insolite du phoque de Weddell (*Leptonychotes weddellii*) en Antarctique. En expulsant brutalement de l'air par ses narines dans les fissures de la glace, il chasse les poissons qui y sont réfugiés.

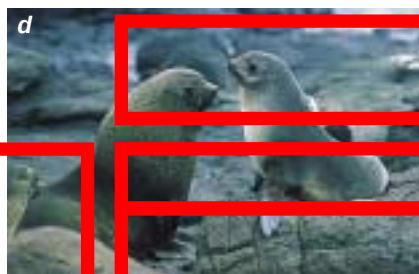
Des stratégies inconnues

Les capteurs électroniques ont d'abord permis la description des comportements de recherche alimentaire des prédateurs. Aujourd'hui, les résultats sont complétés par les méthodes classiques de travail dans les colonies de reproduction et par l'imagerie satellitaire : ils permettent ainsi une approche pluridisciplinaire et intégrative des interactions entre les prédateurs et le milieu marin qu'ils prospectent.

En collaboration avec Guy Duhamel, du Laboratoire d'ichtyologie du Muséum national d'histoire naturelle de Paris, et Charles-André Bost, du Centre d'écologie et de physiologie énergétique de Strasbourg, nous avons comparé, à Kerguelen, le comportement alimentaire des otaries à fourrure (*Antarophylus gazella*) et des manchots royaux (*Aptenodytes patagonicus*) avec celui des poissons myctophidés. Grâce à l'approche combinée d'études à terre pour équiper les animaux et de travaux en mer sur un navire océanographique, nous avons prélevé des poissons, après seulement quelques heures, là où les otaries et les manchots avaient été localisés par le système Argos et aux profondeurs indiquées par les enregistreurs de plongée embarqués.

Nous avons montré que ces animaux prédateurs utilisent des stratégies d'alimentation différentes et complémentaires pour exploiter les myctophidés. Les manchots royaux,





7. LES OISEAUX SAUTEURS (a), les albatros à bec jaune (b), les manchots royaux (c), les otaries à fourrure (d) et les éléphants de mer (e) dont on étudie le comportement alimentaire, sont également des auxiliaires océanographiques pour l'analyse des caractéristiques physiques et biologiques de l'océan Austral.

qui sont des prédateurs visuels, se nourrissent pendant la journée aux dépens de poissons regroupés en bancs serrés en profondeur, alors que les otaries femelles, plus aptes à voir la nuit et munies de vibrisses sensorielles, plongent exclusivement la nuit à de faibles profondeurs, où elles capturent les poissons qui migrent en surface pour se nourrir dès la nuit tombée.

Nous avons également reliés les techniques de pêche des prédateurs avec des paramètres d'océanographie physique, telles la bathymétrie et les températures de surface, et des paramètres biologiques, telles les données satellitaires de chlorophylle de surface et la répartition spatiale des myctophidés : nous avons ainsi déterminé les zones préférentielles d'alimentation des oiseaux et des otaries (voir la figure 5). Ces études nous renseignent sur la plasticité écologique des prédateurs selon les variations de leur environnement.

L'alliance de l'écologie et de l'électronique progressera encore dans les années à venir ; elle dépasse déjà l'étude des seuls oiseaux et mammifères marins. L'utilisation d'appareils miniaturisés et la détermination du régime alimentaire permet de collecter des informations sur la biologie des proies elles-mêmes : les prédateurs deviennent alors des bio-indicateurs des ressources marines (voir *Oiseaux de mer bio-indicateurs*, par Yves Cherel, Henri Weimerskirch, Christophe Guinet et Pierre Jouventin, *Pour la Science*, juillet 1995). Ils peuvent également recueillir

à moindre coût des informations précieuses en océanographie physique.

À partir des données acquises sur des grands albatros de Crozet équipés de balises Argos et d'enregistreurs de température à la patte, on a reconstitué une carte des températures de surface du sud de l'océan Indien, dans une zone où les mesures *in situ* nécessaires à la validation des données satellitaires sont rares et coûteuses à obtenir.

De même, par leur capacité de plongée et leurs longs voyages alimentaires, les éléphants de mer sont de bons auxiliaires pour échantillonner les paramètres physiques dans les 1000 premiers mètres de la colonne d'eau, tels que la température, mais aussi, avec la mise au point de nouveaux capteurs, la salinité et la concentration en chlorophylle.

Les nouveaux moyens d'étude des prédateurs marins apportent des infor-

mations importantes pour leur conservation. Les populations d'albatros et de pétrels de l'hémisphère Sud déclinent, car ces oiseaux se blessent avec les appâts des palangres, ces lignes de fond munies de cordelettes aux extrémités desquelles sont fixés des hameçons. Lors de la mise à l'eau des lignes de palangriers tuent ainsi, chaque année, plusieurs dizaines de milliers d'oiseaux en haute mer et près des côtes. La localisation satellitaire indique les zones marines à protéger prioritairement. Elle met en évidence une fois de plus le besoin d'une législation internationale au-delà des eaux nationales et des zones d'intérêt économique qui ne couvrent souvent qu'une petite partie des zones d'alimentation des oiseaux. Ceux-ci sont protégés sur leurs zones terrestres de reproduction, mais pas en haute mer.

Yves CHEREL, Christophe GUINET et Henri WEIMERSKIRCH sont écologues au Centre d'études biologiques de Chizé du CNRS (www.cebc.cnrs.fr).

R. GENTRY et G. KOONMAN, *Fur Seals: National Strategies on Land and at Sea*, Princeton University Press, 1986.

B. LEBŒUF et R. LAWS, *Elephants Seals. Population Ecology, Behavior and Physiology*, University of California Press, 1994.

R. WILSON, *Foraging Ecology*, in *The Penguins*, pp. 81-106, Oxford University Press, 1995.

G. ROBERTSON et R. GALES, *Albatross Biology and Conservation*, Surrey Beatty and Sons, 1998.

H. WEIMERSKIRCH, Y. CHEREL, F. CUEVO-CHAILLET et V. RIDOUX, *Alternative Foraging Strategies and Resource Allocation by Male and Female Wandering Albatrosses*, in *Ecology*, vol. 78, pp. 2051-2063, 1997.

T. WILLIAMS, R. DAVIS, L. FUIMAN, J. FRANCIS, B. LEBŒUF, M. HORNING, J. CALAMBOKIDIS et D. CROLL, *Sink or Swim : Strategies for Cost-efficient Diving by Marine Mammals*, in *Science*, vol. 288, pp. 133-136, 2000.

La découverte des naines brunes

GIBOR BASRI

Moins massives que les étoiles, mais plus massives que les planètes, les naines brunes semblaient être des objets astronomiques rares. De nouveaux recensements indiquent que ces objets sont peut-être aussi répandus que les étoiles.

Une naine brune est une étoile ratée. Dans une étoile, les réactions de fusion thermonucléaire entre les noyaux d'hydrogène libèrent d'énormes quantités d'énergie qui s'opposent à l'effondrement de la matière dû à la gravitation. Grâce à ces réactions, qui commencent dès que la température atteint trois millions de degrés, l'étoile brille. Or la température du cœur croît avec la pression gravitationnelle et, donc, avec la masse de l'objet. Ainsi, pour briller, un astre doit avoir au moins 75 fois la masse de la planète Jupiter, soit environ sept pour cent de la masse du Soleil. Les naines brunes sont des corps qui ont une masse inférieure; elles sont plus massives que les planètes géantes, mais pas assez massives pour briller comme des étoiles.

Pendant des dizaines d'années, les naines brunes ont été le «chaînon manquant» de l'astronomie : on pensait qu'elles existaient, mais personne n'en avait observé. En 1963, à l'Université de Virginie, Shiv Kumar avait prédit que la contraction gravitationnelle, qui crée les étoiles à partir de grands nuages de gaz et de poussières,

créerait également de nombreux objets plus petits, des «naines brunes». Ce nom est trompeur, car les naines brunes apparaissent rouges, et non brunes, mais on avait déjà nommé «naines rouges» les étoiles dont la masse est inférieure à la moitié de celle du Soleil.

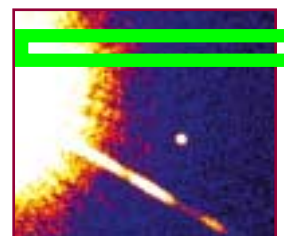
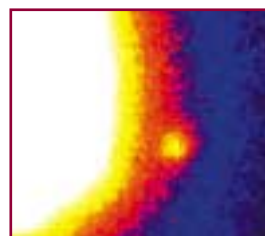
Au milieu des années 1980, les astronomes ont commencé la recherche systématique des naines brunes, mais ils n'ont découvert les premières qu'en 1995. Depuis, on en a trouvé des dizaines d'autres. Les observateurs et les théoriciens poursuivent aujourd'hui l'exploration. Combien y a-t-il de naines brunes? Quelle est la gamme de leur masse? Ont-elles toutes été créées de la même manière?

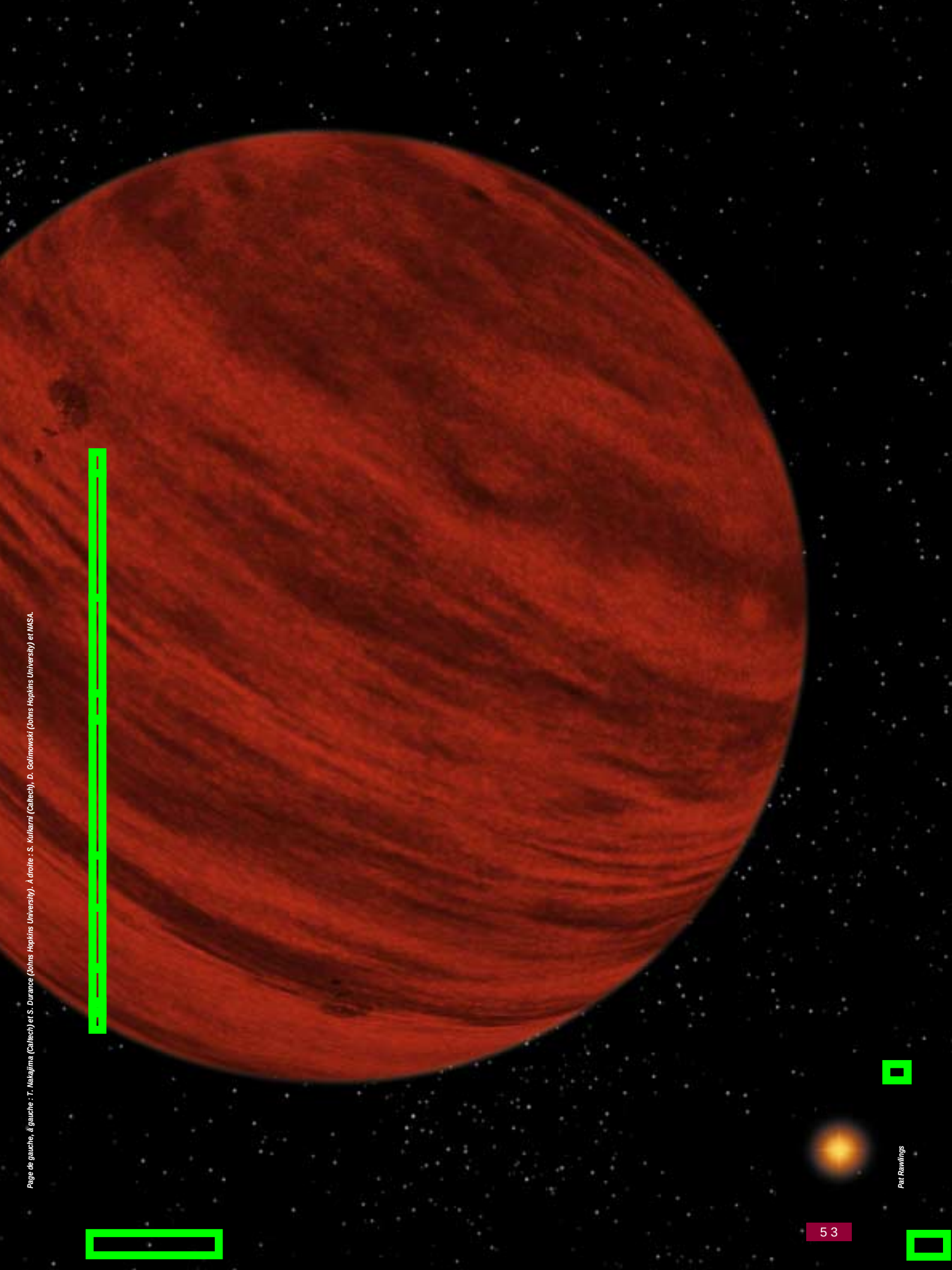
La découverte des naines brunes fut tardive, parce que ces objets sont peu lumineux. Pendant leur formation, tous les objets liés par la gravitation (étoiles, planètes et naines brunes) émettent de la lumière : celle-ci résulte de l'échauffement dû à la libération d'énergie au cours de la contraction gravitationnelle. Dans les étoiles, le rayonnement issu de la fusion de l'hydrogène prend le relais du rayonnement engendré par la contraction.

Lorsque cette fusion est amorcée, la taille et la luminosité de l'étoile restent constantes, le plus souvent pendant des milliards d'années. Dans les naines brunes, l'hydrogène ne fusionne pas et la luminosité décroît rapidement, tandis que la matière se contracte et se refroidit, émettant l'essentiel de son rayonnement dans le proche infrarouge (voir l'encadré de la page 57). Comme la luminosité des naines brunes est faible dès leur formation et qu'elle diminue ensuite, des astronomes pensaient que ces astres constituaient une part notable de la «matière noire», cette mystérieuse matière invisible dont la masse est bien supérieure à celle des objets lumineux de l'Univers.

Où chercher ces astres peu brillants? On a d'abord pensé à les regarder près d'étoiles connues. Plus de la moitié des étoiles de notre Galaxie sont dans des systèmes binaires (où deux étoiles sont en orbite autour de leur centre de gravité commun), et les astronomes soupçonnaient que de nombreuses étoiles apparemment seules avaient pour compagnon une naine brune encore indétectée. Pour voir des naines brunes, on prévoyait ainsi

1. LA NAINE BRUNE GLIESE 229B émet une lueur rougeâtre sur le dessin de la page ci-contre. On pense que cet objet est légèrement plus petit que Jupiter, mais environ 10 fois plus chaud, et 30 à 40 fois plus massif. Le compagnon de l'étoile naine rouge Gliese 229A (vue d'artiste page ci-contre) a été découvert en 1995. Les astronomes ont détecté la naine brune sur des clichés du télescope de 1,5 mètre de diamètre de l'Observatoire du mont Palomar (en médaillon de gauche) et du Télescope spatial Hubble (médaillon de droite) : c'est la petite tache que l'on distingue près de la naine rouge. Gliese 229B se trouve en réalité à plus de six milliards de kilomètres de son étoile compagnon (une distance supérieure à la distance entre Pluton et le Soleil).





de les chercher au voisinage immédiat d'étoiles connues.

Très vite, la stratégie sembla prometteuse. En 1988, Eric Becklin et Benjamin Zuckerman, de l'Université de Los Angeles, repèrent un candidat. Cet objet, GD 165B, est le compagnon rouge et peu brillant d'une naine blanche (les naines blanches sont les restes d'étoiles modérément massives, plus petites, plus chaudes et bien plus massives que les naines brunes). Les mesures indiquaient pour GD 165B une masse 75 fois supérieure à celle de Jupiter, proche de la limite entre les naines brunes et les étoiles peu massives, de sorte que son appartenance à l'une ou à l'autre de ces classes restait discutée.

La recherche de naines brunes comme compagnons d'étoiles présente un autre avantage : la détection directe n'est pas nécessaire. Comme pour la détection des planètes extrasolaires, on cherche les naines brunes en observant les mouvements périodiques des étoiles autour desquelles elles gravitent. Et plutôt que de mesurer les déplacements infimes des compagnons, on observe les décalages Doppler des rayonnements émis par ces étoiles (lorsqu'une étoile s'approche de nous, sa lumière est décalée vers le bleu ; quand elle s'éloigne, la lumière est décalée vers le rouge). Cette méthode est en réalité plus efficace pour la détection des naines brunes que pour celle des planètes : la masse des naines brunes étant supérieure à celle des planètes, le déplacement de l'orbite de l'étoile compagnon est supérieur, et sa mesure facilitée.

Pourtant, Geoffrey Marcy, de l'Université de San Francisco, n'a trouvé aucune naine brune au cours du recensement de 70 étoiles peu massives qu'il a effectué à la fin des années 1980. Puis, au milieu des années 1990, l'étude de 107 étoiles semblables au Soleil a révélé près d'une dizaine de planètes, mais aucune naine brune

avérée. Les naines brunes semblaient bien moins répandues que les planètes géantes, voire que les étoiles. Pourquoi ce « désert de naines brunes » ?

Une seule des premières études révélait une candidate naine brune : après l'examen du décalage Doppler de 1 000 étoiles, au Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, David Latham trouva, en 1988, un compagnon stellaire dont la masse était plus de onze fois celle de Jupiter. Toutefois, la mesure du décalage Doppler ne

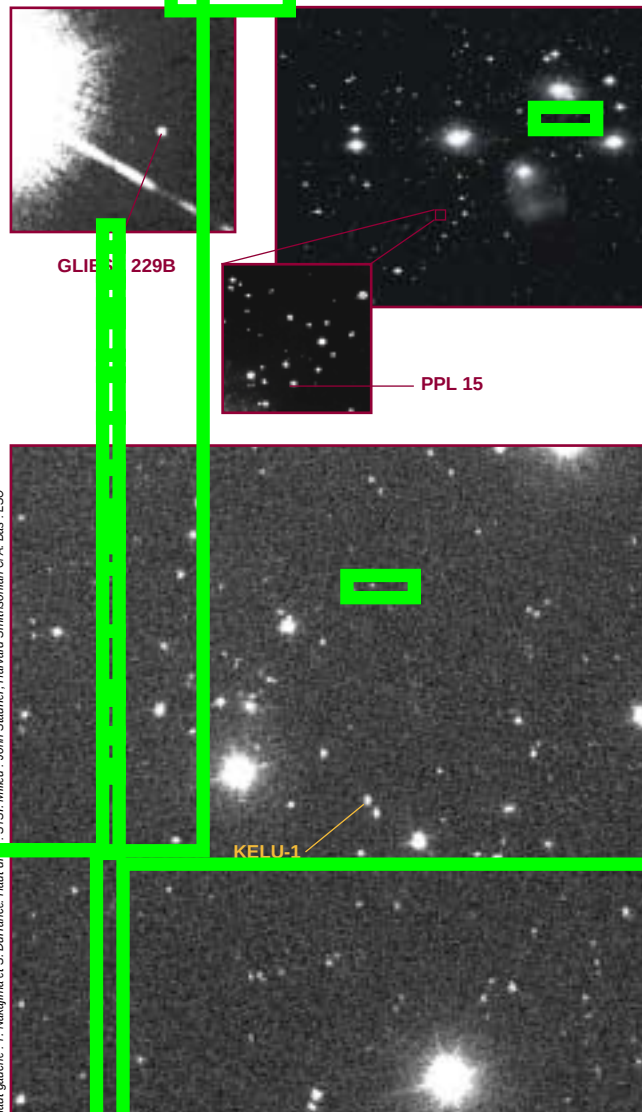
fournissait qu'une limite inférieure pour la masse du compagnon, de sorte que cet objet peut être une étoile de très faible masse plutôt qu'une naine brune. Pour connaître sa véritable nature, on devra déterminer les positions des étoiles avec une précision accrue.

Parallèlement, d'autres astronomes ont employé une méthode différente, fondée sur le fait que les naines brunes jeunes sont plus brillantes que les naines brunes âgées. Or, les meilleurs endroits pour chercher des objets jeunes sont les amas d'étoiles. En effet, les étoiles d'un amas se forment toutes en même temps, mais elles n'ont pas toutes la même durée de vie. Les étoiles les plus massives subsistent pendant quelques millions d'années « seulement » avant de consommer tout leur hydrogène, alors que les étoiles de faible masse brillent pendant des milliards, voire des milliers de milliards d'années. C'est pourquoi on date les amas en cherchant leur étoile la plus massive encore située

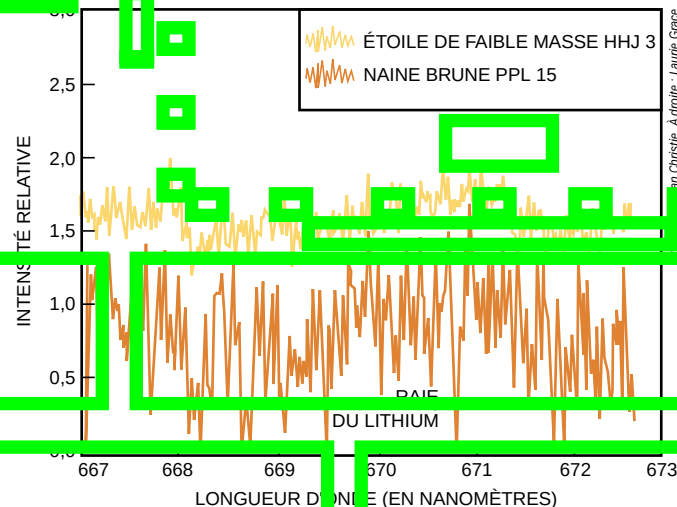
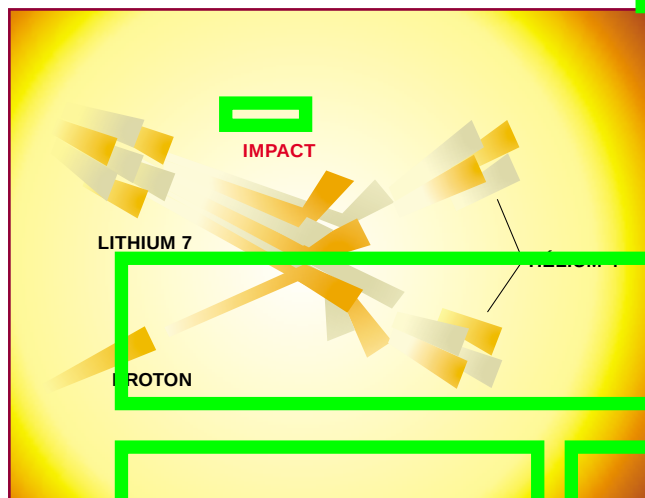
sur la séquence principale (la séquence principale correspond à la période au cours de laquelle les réactions nucléaires transforment l'hydrogène de l'étoile en hélium) : l'âge de l'amas est du même ordre que la durée de vie de cette étoile.

Après avoir localisé un amas jeune et déterminé son âge, les astronomes n'ont plus qu'à y rechercher les objets les moins lumineux et les plus rouges (donc les plus froids). Pour une étoile de masse et d'âge donnés, la théorie de l'évolution stellaire donne la température de surface et la luminosité. Ainsi, en mesurant ces caractéristiques, les astronomes estiment la masse de chaque candidate. Plusieurs équipes se sontattelées à la tâche, étudiant les régions du ciel qui contiennent des amas jeunes. Elles ont repéré des objets rouges faibles.

Ces équipes ont annoncé la découverte d'une série d'objets qui seraient des naines brunes dans les amas jeunes, notamment dans la



2. L'OBSERVATION D'OBJETS PEU BRILLANTS, comme les naines brunes, nécessite des stratégies spécifiques. Certains astronomes cherchent les naines brunes parmi les compagnons d'étoiles connues ; c'est la méthode qui a identifié Gliese 229B (en haut à gauche). D'autres équipes s'intéressent plutôt aux amas stellaires jeunes, parce que c'est dans leur prime jeunesse que les naines brunes sont les plus brillantes. Les astronomes ont scruté l'amas des Pléiades, vieux de 120 millions d'années seulement (en haut à droite), et y ont trouvé de nombreuses naines brunes, telle PPL 15 (en médaillon au centre). Enfin, on détecte aussi des naines brunes isolées en enregistrant la lumière de grandes zones célestes à l'aide d'instruments sensibles aux sources rouges peu brillantes. La découverte de la première naine brune isolée, Kelu-1 (image du bas) date de 1997.



3. L'ANALYSE DU SPECTRE des objets peu lumineux discrimine les étoiles des naines brunes. Toutes les étoiles détruisent le lithium de leur cœur ; dans cette réaction, un proton heurte un atome de lithium 7 (un isotope du lithium dont le noyau est composé de trois protons et quatre neutrons), qui se scinde alors en deux atomes d'hélium 4 (à gauche). Seules les plus massives des naines brunes ont une

température interne suffisante pour que cette destruction du lithium ait lieu. Dans la plupart des naines brunes, le lithium reste présent. Le spectre de HHJ 3 (à droite, ligne jaune), une étoile peu massive de l'amas des Pléiades, n'a aucune trace de lithium. En revanche, le spectre de la naine brune PPL 15 (ligne rouge) possède une raie d'absorption qui indique la présence de cet élément.

région de formation d'étoiles de la constellation du Taureau et dans l'amas des Pléiades. Malheureusement, une étude approfondie a montré qu'aucune de ces candidates n'était une naine brune. Certaines étaient des étoiles rouges géantes, situées à des milliers d'années-lumière derrière l'amas ; c'est l'éloignement qui les fait paraître si peu brillantes, mais elles sont intrinsèquement très lumineuses. D'autres étaient des étoiles peu massives situées devant ou derrière l'amas. Ces annonces prématurées ont renforcé le scepticisme des astronomes et fait penser que les naines brunes étaient vraiment rares.

À la recherche du lithium

Toutefois, en 1992, Rafael Rebolo, Eduardo Martín et Antonio Magazzu, de l'Institut d'astrophysique des îles Canaries, ont proposé une autre méthode pour différencier les étoiles peu massives et les naines brunes : le «test du lithium». Ce test utilise le fait qu'une naine brune d'une masse inférieure à 60 fois la masse de Jupiter n'est ni assez comprimée ni assez chaude pour que le lithium y fusionne : cette réaction commence à une température légèrement inférieure à celle de la fusion de l'hydrogène, donc que les étoiles classiques, qui atteignent facilement des températures importantes, épuisent rapidement leurs réserves initiales de lithium. Même les étoiles les moins massives brûlent tout leur lithium en 100 millions d'années envi-

ron, alors que la plupart des naines brunes (excepté les plus massives d'entre elles) conservent leur lithium. Ainsi, la présence de lithium dans un astre montre que ce dernier a une masse inférieure à celle d'une étoile.

Les raies spectrales du lithium sont assez intenses dans les objets rouges froids. L'équipe des Canaries a recherché ces raies dans les objets les plus froids du ciel suffisamment brillants pour qu'on obtienne un spectre d'une qualité satisfaisante : aucun ne contenait de lithium. Puis, en 1993, avec G. Marín et James Graham, j'ai repris le test du lithium pour étudier des objets moins brillants, à l'aide du télescope Keck de dix mètres de diamètre, à Hawaï. Nous n'avons pas non plus observé de lithium... jusqu'à ce que nous pointions le télescope vers l'amas des Pléiades.

Des astronomes britanniques venaient de réaliser un recensement détaillé de cet amas. Ils avaient détecté plusieurs objets qui, en principe, devaient être moins massifs que des étoiles. Ils ont montré que ces objets se déplaçaient dans le ciel avec l'amas, et qu'ils étaient donc des membres de l'amas, et non des étoiles situées devant ou derrière. Nous avons sélectionné le plus brillant, un objet nommé HHJ 3, nous attendant à y trouver du lithium : il n'y en avait pas. Toutefois, notre collègue John Stauffer nous proposa une autre cible, parce qu'il avait également sondé les Pléiades à la recherche d'objets peu massifs et y avait décelé

une candidate encore moins brillante : PPL 15 (la quinzième candidate du relevé effectué au mont Palomar, dans la constellation des Pléiades). Ce fut un succès pour la première fois, nous détectâmes du lithium dans un objet dont la masse semblait inférieure à celle d'une étoile. Nos résultats indiquaient que l'amas avait environ 120 millions d'années, d'où l'on déduisait une masse de PPL 15 à la limite supérieure du domaine des naines brunes.

La même année, en 1995, le groupe des Canaries avait également cartographié l'amas des Pléiades et détecté deux objets encore moins brillants que PPL 15 : Tïde 1 et Calar 3. Tous deux avaient une masse supposée légèrement inférieure à 60 masses de Jupiter. À la fin de l'année, je me suis joint au groupe des Canaries, et nous avons confirmé la présence du lithium dans ces deux objets. La communauté astronomique est restée sceptique pendant quelques mois (après tout, ces objets ressemblaient à des étoiles), jusqu'à ce que de nouvelles découvertes confirment nos résultats.

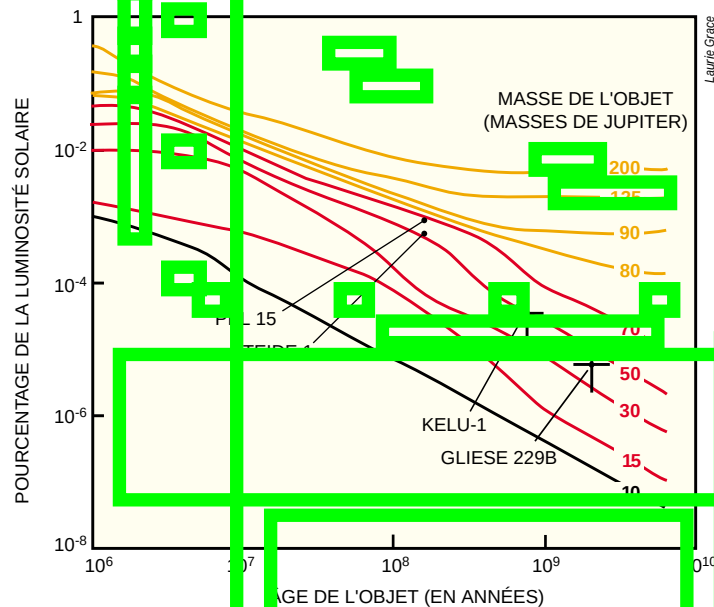
À la même époque, une recherche d'un tout autre type a porté ses fruits de façon spectaculaire. Des astronomes de l'Institut de technologie de Californie et de l'Université Johns Hopkins étudiaient des étoiles proches peu massives, espérant trouver des compagnons qui soient des naines brunes. Ils avaient équipé le télescope de 1,5 mètre de diamètre du mont Palomar d'un instrument qui occultait la quasi-totalité

de la lumière de l'étoile principale, ce qui permettait de voir plus facilement un éventuel compagnon. En 1993, ils avaient repéré plusieurs candidates naines brunes. Afin de s'assurer que ces objets n'étaient pas des étoiles de l'arrière-plan, ils ont attendu un an, puis ils ont pris de nouveaux clichés. Comme ces objets sont relativement proches du Système solaire, leur mouvement dans la Galaxie se distingue de celui des étoiles de l'arrière-plan. L'un des compagnons ainsi étudié était 1 000 fois moins brillant que l'étoile principale. Gliese 229B, l'étoile principale étant déjà de faible luminosité, la luminosité du compagnon était nécessairement bien inférieure à celle de l'étoile la moins brillante possible. Avant d'annoncer leur découverte, le groupe a attendu d'obtenir un spectre infrarouge de l'objet.

La découverte de Gliese 229B, le compagnon naine brune de Gliese 229A, fut annoncée en octobre 1995, au cours d'une conférence à Cambridge. Très peu lumineux, Gliese 229B était nettement moins massif qu'une étoile et, surtout, l'analyse de son spectre a révélé qu'il contenait du méthane. On trouve couramment du méthane dans l'atmosphère des planètes géantes, mais les étoiles sont toutes trop chaudes pour qu'il s'y forme. Sa présence en quantité notable dans Gliese 229B prouvait que cet objet n'est pas une étoile.

Au cours de la même conférence, le groupe des Canaries a annoncé l'observation de plusieurs nouvelles candidates naines brunes dans l'amas des Pléiades : l'idée que ces objets soient rares s'évanouissait. En outre, Michel Mayor et ses collègues de l'Observatoire de Genève ont annoncé la découverte de la première planète extrasolaire, une géante gazeuse en orbite autour de l'étoile 51 de la constellation de Pégase. Le même matinée, les astronomes apprenaient que la recherche, longtemps infructueuse, d'objets «sub-stellaires» était enfin couronnée de multiples succès.

La plupart des astronomes considèrent Gliese 229B comme la première



4. L'ÉVOLUTION DE LA LUMINOSITÉ des étoiles peu massives (courbes jaunes) et des étoiles (courbes rouges) et des planètes (courbe noire) montre que seules les étoiles sont assez massives pour avoir une luminosité stable. La lumière émise par les naines brunes et par les planètes décroît quand elles vieillissent. Les données relatives aux naines brunes (points et courbes noirs) indiquent leur âge et leur masse.

naine brune incontestable à avoir été découverte, car elle est un million de fois moins brillante que le Soleil, et sa température de surface est inférieure à 1 000 kelvins (c'est-à-dire très inférieure à la température minimale de 1 800 kelvins environ que produirait la moins brillante des étoiles possible). Elle a atteint cet état parce qu'elle est vieille de quelques milliards d'années. Nous ne connaissons pas son âge précis, et nous ne pouvons donc pas calculer précisément sa masse, qui est probablement comprise entre 30 et 40 fois la masse de Jupiter. PPL 15, Teide 1 et Calar 3 sont plus massives (de 50 à 70 masses de Jupiter) et bien plus chaudes (avec des températures de surface comprises entre 2 600 et 2 800 kelvins), principalement en raison de leur plus jeune âge.

Une fois les méthodes de détection des naines brunes mises au point, les découvertes se sont enchaînées. Plusieurs groupes se sont à nouveau intéressés aux Pléiades : l'équipe espagnole y a découvert une naine brune dont la masse est à peine 35 fois celle de Jupiter ; c'est la plus légère des naines brunes détectées dans cet amas. Plus intéressant encore, ce même groupe a estimé le nombre de naines brunes des Pléiades en comptant les candidates les plus vraisemblables sur une petite région et en extrapolant le résultat à l'ensemble de l'amas : le nombre de naines brunes semble être du même ordre de grandeur

que celui des étoiles dans les Pléiades ! Si ce résultat est généralisable, notre Galaxie contient à elle seule environ 100 milliards de naines brunes. Toutefois, les naines brunes ne sont pas le principal constituant de la masse de l'Univers : légères, elles auraient dû être au moins 100 fois plus nombreuses que les étoiles (on estime que la matière noire est dix fois plus massive que la matière visible, étoiles, galaxies, etc.). Les naines brunes ne résolvent pas le mystère de la matière noire.

Quel est l'éventail des masses des naines brunes ? Quelle est la limite inférieure de masse pour une naine brune ? Est-elle égale à la limite supé-

rieure de la masse des planètes (environ 13 fois la masse de Jupiter) ? Ou bien une différence de masse entre les naines brunes et les planètes résulte-t-elle de mécanismes de formation différents ? On cherche la réponse à ces questions en analysant les amas stellaires en formation, où les naines brunes très légères émergent assez pour être vues. Le recensement de la région du Taureau et celui de la région d'Orion a mis en évidence des objets dont la masse semble être à peine supérieure à 13 fois celle de Jupiter : les masses des naines brunes semblent très variées (voir l'encadré à la page 59).

En 1997, le groupe de M. Mayor a détecté une dizaine de naines brunes probables en cherchant des systèmes binaires associés à 600 étoiles semblables au Soleil. Néanmoins, l'idée d'un « désert de naines brunes » subsistait, car les études du décalage Doppler révélèrent bien moins de naines brunes que de planètes, alors que les naines brunes sont en principe plus faciles à trouver par cette méthode. Récemment, une analyse minutieuse des données du satellite d'astrométrie *Hipparcos* (qui a mesuré précisément la position des étoiles) a montré que la moitié au moins des candidates naines brunes de M. Mayor sont des étoiles légères : le désert des naines brunes s'est encore vidé. La suite de l'étude menée par G. Marcy sur un échantillon d'étoiles de type solaire

un système binaire constitué de deux

Avec E. Martín, j'ai déterminé que la naine brune PPL 15 des Pléiades est en réalité une paire de deux naines brunes rapprochées, dont la période orbitale est de six ans. Puis, avec l'astronome

tationnelle, décroît. Bien que les étoiles de très faible masse puissent briller pendant des milliers de milliards d'années, les naines brunes s'éteignent progressivement, de sorte que plus elles sont âgées, plus il est difficile de les détecter. Dans un avenir très lointain, lorsque toutes les étoiles auront fini de brûler, les naines brunes seront le principal réservoir d'hydrogène de l'Univers.

The diagram illustrates the stages of star formation, showing the progression from a molecular cloud to a main sequence star. The stages are connected by arrows indicating the flow of time and the physical processes involved.

100 000 ANS
NUAGE MOLÉCULAIRE INTERSTELLAIRE
 Rayon : 100 milliards de kilomètres
 Température : 10 kelvins

1 MILLION D'ANNÉES
NAÏVE BRUNE ET DISQUE D'ACCRETION
 Rayon du disque : entre 1 et 5 milliards de kilomètres
 Rayon de la naine brune : 350 000 km
 Température : 2 900 kelvins

10 MILLIONS D'ANNÉES
NAÏVE BRUNE ET PLANÈTE
 Rayon de l'orbite planétaire : entre 100 millions et 500 millions de kilomètres
 Rayon de la naine brune : 350 000 km
 Température : 2 900 kelvins

100 MILLIONS D'ANNÉES
EFFONDREMENT GRAVITATIONNEL
 Rayon de la naine brune : 100 000 kilomètres
 Température : 2 500 kelvins

1 MILLIARD D'ANNÉES
REFROIDISSEMENT RADIATIF
 Rayon de la naine brune : 60 000 kilomètres
 Température : 1 200 kelvins

10 MILLIARDS D'ANNÉES
SECOURSANCE JUSQU'À LA NAINES BLANCHE
 Rayon de la naine brune : 60 000 kilomètres
 Température : 550 kelvins

UNE NAINES BRUNE NAÎT de la contraction d'un immense nuage de gaz et de poussières. Après un million d'années, c'est une boule de gaz rougeoyante, peut-être entourée d'un disque d'accrétion, qui pourrait engendrer une planète en orbite autour de la naine brune (on n'a pas encore détecté de telles planètes ; leur existence n'est qu'hypothétique). Progressivement, les naines brunes se contractent et se refroidissent. Les rayons et les températures de surface indiqués ici correspondent à un objet 40 fois plus massif que Jupiter.

allemand Wolfgang Brandner, nous avons récemment observé une paire serrée de naines brunes proches, qui devrait fournir, d'ici à dix ans, la première confirmation dynamique des masses des naines brunes (la détermination de la période de rotation permet une mesure précise des masses).

Ainsi, le désert de naines brunes n'est qu'au tour d'étoiles massives.

Autour de objets légers (petites étoiles ou naines brunes), les chances de trouver un compagnon qui soit une naine brune sont supérieures. Cette différence résulte probablement des mécanismes – encore inconnus – qui créent les systèmes binaires. Ces mécanismes semblent moins favorables à la production d'un système où l'objet principal a plus de dix fois la masse du compagnon.

Des naines brunes partout

Une autre technique a aussi révélé des naines brunes isolées, perdues au milieu des myriades d'étoiles de la Galaxie : un cartographie de grandes zones du ciel avec un instrument particulièrement sensible aux sources rouges de faible intensité. La première naine brune ainsi décelée l'a été par María Teresa Ruiz, de l'Université du Chili, en 1997. Elle l'a nommée Kelu-1, d'après un mot indien qui signifie rouge. Du lithium y a été détecté. À peu près au même moment, le relevé DENIS (*Deep Near-Infrared Survey*, ou « relevé profond dans le proche infrarouge »), un projet européen de recensement du ciel austral dans l'infrarouge, a révélé trois objets similaires. Les astronomes ont rapidement confirmé la présence de lithium dans l'un d'eux.

L'étude de ces objets a fourni des indices sur l'atmosphère des naines brunes : la composition de la lumière visible qu'ils émettent révèle une absence de molécules d'oxyde de titane et d'oxyde de vanadium, qui dominent le spectre des étoiles peu massives. Ces molécules n'apparaissent pas dans les atmosphères des naines brunes, parce que les éléments lourds qui les composent se condensent en grains de poussières réfractaires qui restent solides aux faibles températures des naines brunes. Pour les naines brunes, les principales raies du spectre dans le visible sont celles de métaux alcalins neutres, comme le sodium, le potassium, le rubidium, le césium et, parfois, le lithium.

L'équipe 2MASS (acronyme de *Two Micron All-Sky Survey*, soit « recensement de la voûte céleste à deux micromètres ») de l'Université du Massachusetts a également trouvé des naines brunes dans notre Galaxie (près de 100 candidates) et a confirmé la présence de lithium pour une vingtaine d'entre elles. La plupart de ces objets ont des températures de surface comprises entre 1 600 et 2 200 kelvins, et leur âge est sans doute inférieur à un milliard d'années. En raison de leur jeunesse, ces objets sont relativement brillants et donc plus faciles à observer que des objets plus vieux.

La chasse aux naines brunes isolées plus âgées est restée infructueuse jusqu'à l'été 1999, quand le recensement numérique *Sloan* a révélé deux naines

Les naines brunes de DENIS

À la fin de l'année 2000, après cinq années d'observations continues sur un télescope de un mètre de diamètre, la phase d'acquisition des données DENIS s'achèvera. Ce premier programme de cartographie numérique du ciel austral en infrarouge proche (entre 0,8 et 2,5 micromètres) a été réalisé à l'Observatoire européen austral (ESO), au Chili, par l'Observatoire de Paris, en association avec plusieurs partenaires français et européens.

L'un des résultats les plus spectaculaires de ce programme, comme de son homologue américain 2MASS, a été la découverte du premier échantillon de naines brunes et d'étoiles de très faible masse isolées, c'est-à-dire non associées à un amas d'étoiles jeunes comme les Pléiades, ni à une étoile sous forme d'un système binaire, comme Gliese 229A/B. Xavier Delfosse et Thierry Forveille, de l'Observatoire de Grenoble, ont particulièrement contribué à ce travail de pionnier en extrayant les candidates dans la base de données DENIS et en participant aux observations spectroscopiques nécessaires à la confirmation du statut de naines brunes des candidates.

En comparant les propriétés observées et les prédictions, les astronomes améliorent les modèles et comprennent mieux la formation et l'évolution de ces objets singuliers. Reste à constituer des échantillons complets et fiables, c'est-à-dire exhaustifs, jusqu'à une certaine valeur de la luminosité apparente, ce que seuls des relevés homogènes à très grande échelle permettent. Ainsi améliorera-t-on la connaissance de certaines données essentielles et mal connues de l'astrophysique, telles la répartition de la masse des étoiles lorsqu'elles se forment (la fonction de masse initiale) ou la densité spatiale des étoiles de masse inférieure à une valeur donnée. Ces estimations nécessitent la collecte d'échantillons de grande taille, de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers d'objets.

À terme, après l'analyse de l'intégralité des données, DENIS et 2MASS fourniront ces estimations, mais c'est un travail de tri énorme : un objet sur plusieurs centaines de milliers est retenu pour passer les tests spectroscopiques indispensables sur des télescopes géants où le temps d'observation est particulièrement coûteux.

L'horizon de ces relevés reste cependant limité : en raison de leur sensibilité, DENIS et 2MASS n'explorent le cosmos que jusqu'à une vingtaine de parsecs (65 années-lumière) pour les naines brunes isolées et à moins de 200 parsecs (650 années-lumière) pour les naines brunes associées à des amas jeunes ou à des régions de formation stellaire récente.

De nouveaux relevés à grande échelle, encore en projet, étendront la recherche dans l'espace, afin d'augmenter le volume de la Galaxie exploré, et aux plus grandes longueurs d'onde (entre trois à dix micromètres), afin de détecter des objets encore plus froids – c'est-à-dire plus vieux et / ou encore moins massifs. Pour l'instant, on ne sait presque rien de ces objets isolés, ni s'ils possèdent des planètes. Ces relevés répondront peut-être à ces questions dans la prochaine décennie.

Nicolas EPCHTEIN, Programme DENIS,
Observatoire de la Côte d'Azur, Nice

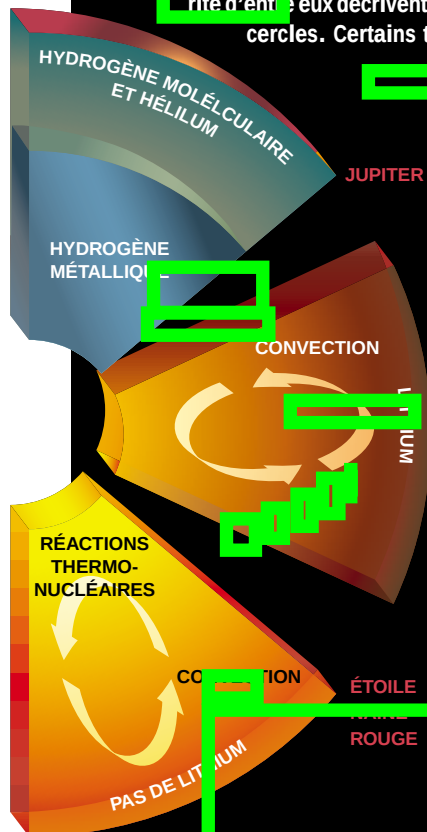
Planètes contre naines brunes

Existe-t-il une différence fondamentale entre les plus grosses des planètes et les plus petites des naines brunes? On supposait naguère que les planètes ne se forment pas de la même manière que les étoiles ou que les naines brunes. Les planètes géantes gazeuses se seraient formées par accrétion de planétésimaux (de petits corps de roches ou de glaces) au milieu d'un disque de gaz et de poussières entourant une étoile. En quelques millions d'années, ces nouveaux corps auraient attiré d'énormes enveloppes de gaz. Selon cette théorie, mise au point à partir de l'étude du Système solaire, toutes les planètes devraient se trouver en orbite quasi circulaire autour de leur étoile, et les planètes géantes gazeuses devraient être sur des orbites relativement lointaines.

Ces prévisions ont été contredites par la découverte des premières planètes géantes extrasolaires : la plupart d'entre elles sont sur des orbites proches de leur étoile, et la majorité d'entre elles décrivent des orbites allongées plutôt que des cercles. Certains théoriciens ont même prôné l'exis-

tence de planètes solitaires, éjectées de leur système stellaire par des interactions orbitales avec des planètes sœurs. Ainsi, les observateurs distinguent très difficilement les planètes des naines brunes à partir de leur lieu et de leur mode de formation, ou de leur situation et de leur mouvement actuels. On peut trouver des naines brunes isolées, d'autres sont des compagnons d'étoiles ou d'autres naines brunes. Il en est peut-être de même pour les planètes géantes.

Une nouvelle approche intéresse aujourd'hui les astrophysiciens : elle propose comme critère de distinction entre planètes et naines brunes l'allumage ou non des réactions de fusion nucléaire. Selon ce critère, la limite se situe à environ 13 masses de Jupiter. Au-delà de cette masse, la fusion du deutérium commence au sein de l'objet. Le fait que les naines brunes semblent être moins nombreuses que les planètes (du moins en tant que compagnons d'étoiles massives) est le signe de mécanismes de formation différents. Il est cependant beaucoup plus facile d'observer une distinction fondée sur la masse.



UN CONTINUUM D'OBJETS, des planètes aux étoiles (ci-dessous), montre que les naines brunes plus âgées, telle Gliese 229B, ont des tailles et des températures de surface très semblables à celles des planètes géantes gazeuses. Les naines brunes plus jeunes, telle Teide 1, ressemblent davantage à des étoiles peu massives du type de Gliese 229A. Les naines brunes et les étoiles peu massives sont totalement convectives, c'est-à-dire que leurs constituants sont brassés (à gauche). Les réactions nucléaires, au sein de l'étoile, détruisent complètement leur lithium, et la présence de celui-ci dans un objet est le signe qu'il peut s'agir d'une naine brune.

NOM	JUPITER	GLIESE 229B	TEIDE 1	GLIESE 229A	SOLEIL
TYPE D'OBJET	Planète géante gazeuse	Naine brune	Naine brune	Étoile naine rouge	Étoile naine jaune
MASSES (en masses de Jupiter)	1	30-40	55	300	1 000
RAYON (en kilomètres)	71 500	65 000	150 000	250 000	696 000
TEMPÉRATURE (en kelvins)	100	1 000	2 600	3 400	5 800
ÂGE (en années)	4,5 milliards	2-4 milliards	120 millions	2-4 milliards	4,5 milliards
FUSION DE L'HYDROGÈNE	Non	Non	Non	Oui	Oui
FUSION DU DEUTÉRIUM	Non	Oui	Oui	Oui	Oui

La phase initiale de découverte des naines brunes touche à sa fin. Les astronomes ont des méthodes de détection efficaces et de nombreuses candidates pour une étude détaillée. D'ici à quelques années, les astronomes préciseront les données fondamentales sur ces objets : leur nombre, leur masse, et leur répartition dans la Galaxie. Les astrophysiciens examineront également les mécanismes de formation, qu'il s'agisse de ceux de compagnons stellaires ou d'objets isolés, ainsi que les mécanismes qui refroidissent leur atmosphère. Il aura donc fallu attendre la fin du siècle pour que ces objets, pourtant aussi répandus que les étoiles, commencent à nous livrer leurs secrets !

Brown Dwarfs and Extrasolar Planets,
sous la direction de R. Rebolo,
E.L. Martín et M.R. Zapatero Osorio,
Astronomical Society of the Pacific
Conference Series, vol. 134, 1998.

Les lapsus

MARCO ROSSI • ÉVELYNE PETER DEFFARE

L'étude de la fréquence et de la nature des lapsus révèle que ces erreurs de langage ne sont pas produites de façon aléatoire. Leur formation éclaire les mécanismes de production et de contrôle du langage.

Lors d'un repas entre amis, une jeune femme revient après un moment d'absence. Devant l'air étonné des convives, elle s'explique : *J'ai suis sortie boire une clope, euh! fumer un verre, ah zut!* Les deux erreurs sont involontaires et, dans la seconde, elle essaie, sans succès, de se corriger : son intention de *sortir fumer une clope* est entrée en compétition avec le désir de *boire un verre*.

Ces deux erreurs de langage sont des lapsus, une déviation de l'intention du locuteur ayant pour résultat une modification non intentionnelle de la forme linguistique. Nous commettons, en moyenne, un lapsus tous les 600 à 900 mots.

Les erreurs de langage ne sont pas forcément des lapsus : ainsi en est-il du jeu de mots ou de la contrepétition, qui utilisent pourtant les mêmes mécanismes. C'est également le cas des impropriétés paronymiques, dont le linguiste français Ferdinand Brunot avait recueilli un florilège, au début des années 1920 : *condoléances* pour *doléances*, *intervi* pour *pervi*, *intact* pour *intègre*, *comestible* pour *combustible*, *déflagration* pour *dégradation*, etc. Ces « erreurs » entre des mots apparentés par la forme (entre paronymes) traduisent une ignorance du vocabulaire : bien qu'involontaires, ce ne sont pas des lapsus et elles ne sont jamais corrigées. Plus de 70 pour cent des lapsus sont immédiatement corrigés dès que le locuteur prend conscience du trouble causé par l'anomalie introduite dans son message. Ainsi un lapsus est-il à la fois involontaire et – le plus souvent – corrigé.

À la fin du XIX^e siècle, le grammairien allemand Paul Hermann comprit l'importance des lapsus pour l'histoire des langues : il suggéra que leur étude pourrait révéler les mécanismes de certaines évolutions linguistiques. Ainsi,

formatif aurait dû donner le mot *fromage* et non *fromage*. Toutefois, le groupe *fr* étant si fréquent dans la langue française, parce qu'il est plus facile à prononcer, c'est le terme *fromage* qui a été adopté. Une telle intervention de consonne est fréquente dans les lapsus : nous savons aujourd'hui que le langage est programmé et, lorsqu'un locuteur prononce la première voyelle (le *o*), la consonne qui suit (le *r*) est déjà prête et attend d'être produite. Parfois, la production est anticipée, et la consonne est émise avant la voyelle.

C'est le linguiste allemand Rudolf Meringer qui est, en réalité, le fondateur de la recherche linguistique sur les lapsus. Il a enregistré 8 800 erreurs de langage (les *lapsus linguae*), d'écriture (les *lapsus calami*) et de lecture (les *lapsus lectonis*) en allemand ; il a relevé 4 400 *lapsus linguae*.

En 1900, Sigmund Freud a proposé une interprétation psychanalytique des lapsus, mais il faudra attendre les années 1960 pour que ces erreurs de langage suscitent un nouvel intérêt, essentiellement pour l'allemand, l'anglais et l'italien. Les lapsus du français ont été longtemps négligés. Nous avons tenté de combler ce vide, depuis 1992, en recueillant un corpus de plus de 4 000 lapsus. Simultanément, Pierre Arnaud, à l'Université Louis Lumière de Lyon, préparait aussi un recueil de lapsus.

Sans mettre en doute la valeur psychanalytique des lapsus, les linguistes ont constaté que l'on peut classer les exemples proposés par Freud d'après des critères objectifs, au même titre que les autres erreurs de langage. Il est normal de produire des lapsus ; ce sont, des anomalies qui reflètent les mécanismes de fonctionnement et de production du langage. Cela explique l'engouement des linguistes et des psycholinguistes pour l'étude des lapsus.

L'analyse des types de lapsus et de leur fréquence a permis l'identification des mécanismes de leur production. Il arrive souvent, en médecine, que l'on déduise les propriétés d'une protéine normale des maladies provoquées par cette protéine, quand elle est anormale. De même, on déduit de l'étude d'anomalies – les lapsus – les mécanismes normaux de production et de perception du langage.

Les divers types de lapsus

On classe les lapsus selon deux grands critères : la catégorie linguistique et le type de l'erreur. Divers exemples illustreront les types de lapsus.

Ils ont chanter la cloche, pardon la classe politique est une erreur de mots (*cloche* pour *classe*). *I faut pas s'emberlificoter... s'emberlificoter sur les mots* ; le premier verbe correspond à une erreur de syllabe (insertion de la syllabe *fi*). *Le Figaro Magarine, euh ! Magazine* est une erreur de consonne (substitution de *r* à *z*). Ces trois lapsus sont des erreurs linguistiques.

Par ailleurs, on dénombre six types d'erreurs (voir la figure 1). *La mise en pièce, euh ! la mise en scène de la pièce* est une substitution (*pièce* substituée à *scène*). *La proposition de geler les fonctionnaires, euh ! les salaires des fonctionnaires* est une omission (*les salaires* ont été omis). *Il faut changer votre groupe de sécurité sociale, oh ! de sécurité, ça suffira !* est une insertion : l'expression *sécurité sociale* est tellement pregnante que l'adjectif *sociale* vient tout naturellement après *sécurité* – même s'il s'agit de la sécurité d'une installation électrique.

Un pac de seins à la place d'un sac de pain, le chour est faud pour le four est chaud sont des interventions. L'intervention, opération fondatrice de la contrepétition, existe aussi avec des

mots entiers, mais moins souvent qu'avec des phonèmes (les voyelles et les consonnes) ou des syllabes.

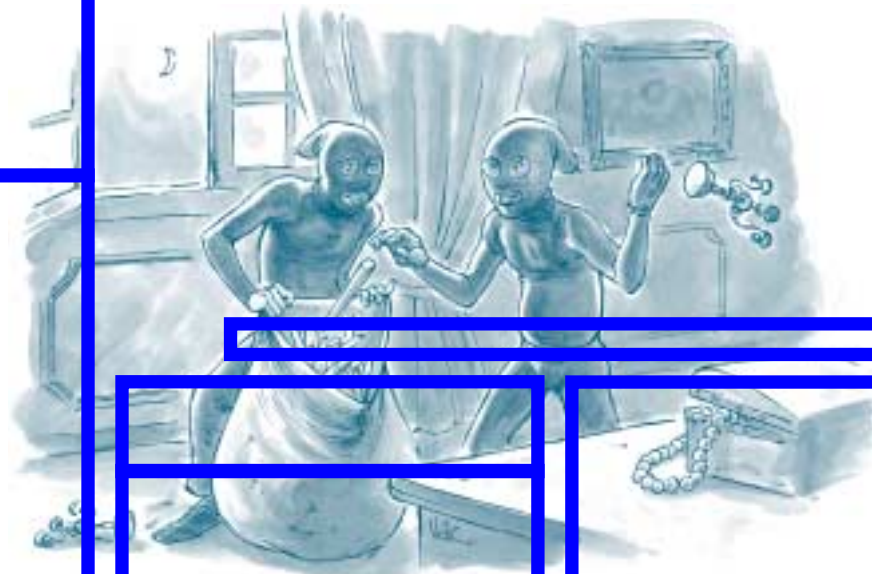
Un mot de de chansons ébouristouflant est un amalgame : lorsque le locuteur veut qualifier le monde de la chanson, deux appréciations s'offrent à lui, ébouriffant et époustouflant ; ces deux adjectifs quasi synonymes se présentent avec la même force, et un compromis est trouvé par la combinaison de la première partie de l'un et de la seconde de l'autre.

Non, il n'a pas été ambudgé... amputé le budget est une haplogologie : ce terme, dérivé du grec haplos (simple) et logos (parole), désigne une opération de simplification par télescopage d'une séquence de mots présents dans le message. Une haplogologie survient pour diverses raisons : le débit de parole est trop rapide, les syllabes initiale et finale accentuées sont plus fortes ; les syllabes inaccentuées médianes, peu porteuses d'information, sont négligées. La tendance à l'anticipation, fondamentale dans le langage, conduit à l'omission de catégories intermédiaires et au maintien des seules syllabes fortes.

Quelles sont les différences entre l'haplogologie et l'omission, d'une part, l'haplogologie et l'amalgame, d'autre part ? L'omission est une sorte de télescopage, mais les unités linguistiques résultantes ne sont pas altérées (geler, les fonctionnaires) ; en revanche, l'haplogologie est un télescopage par recombinaison (ambudgé pour amputé le budget, la dégralité pour la dégradation de la qualité, par exemple).

La différence entre haplogologie et amalgame, qui sont toutes deux exclusivement des erreurs de mots, est d'un autre ordre et fournit une clé pour l'interprétation des lapsus. La cause de l'amalgame se situe très en amont dans le processus d'encodage de la parole : deux ou plusieurs prétendants qui se présentent dès le niveau conceptuel se font concurrence. Le choix – ou le compromis – est opéré entre les membres d'un paradigme, c'est-à-dire entre des mots voisins appartenant à une même classe (ébouriffant ou époustouflant). C'est pourquoi l'amalgame est une erreur dite paradigmatique.

Au contraire, l'haplogologie est syntagmatique : c'est une recombinaison entre les mots d'une séquence déjà planifiée, qui sont présents simultanément dans une proposition (ou syntagme). En d'autres termes, un lapsus est paradigmatique quand l'origine de l'erreur



Et ils ont volé des bougies... non, pas des bougies, des bijoux!

est indépendante du contexte de l'énoncé, syntagmatique quand elle est fonction de ce contexte.

Ainsi, l'amalgame est paradigmatique, et l'haplogologie, l'omission et l'interruption sont syntagmatiques ; les autres types de lapsus, c'est-à-dire l'insertion et la substitution, sont soit paradigmatiques soit syntagmatiques. Dans Ils font chanter la cloche, pardon la classe politique, la substitution de cloche à classe est paradigmatique : le mot cloche s'est présenté comme concurrent de classe au niveau conceptuel, lapsus révélateur de la piètre opinion du locuteur pour la classe politique. La substitution de pièce à scène (La mise en pièce, euh ! la mise en scène de la pièce) est syntagmatique, car elle est une anticipation d'un élément du syntagme la mise en scène de la pièce.

Un critère supplémentaire intervient dans la dimension syntagmatique : dans l'exemple Philippe Brocard,

euh ! Philippe Vasseur brocarde les décisions, l'origine du lapsus Brocard se trouve dans le terme brocarde, c'est-à-dire dans la séquence planifiée, mais non encore produite : il en est de même dans l'exemple où pièce se substitue à scène. Dans ces deux cas, il s'agit d'une substitution par anticipation, laquelle révèle un mécanisme de production du langage : les phrases ne sont pas produites mot à mot, mais, lorsqu'un mot est émis, une proposition – au moins – est déjà prête.

Erreur d'anticipation

J'aime mieux un attelage de chemins, euh !... de chiens, car un chien sait retrouver son chemin. Dans cet exemple, lorsque le mot attelage est prononcé, le mot chemin est déjà programmé et en attente ; quand le centre cérébral du langage est activé pour produire la première proposition, il termine

La Grande-Bretagne aussi a changé de roi... de loi.



(Conférence de presse du 16 avril 1998)

simultanément la programmation de la proposition suivante. C'est cette activité parallèle dans le centre du langage qui assure l'anticipation.

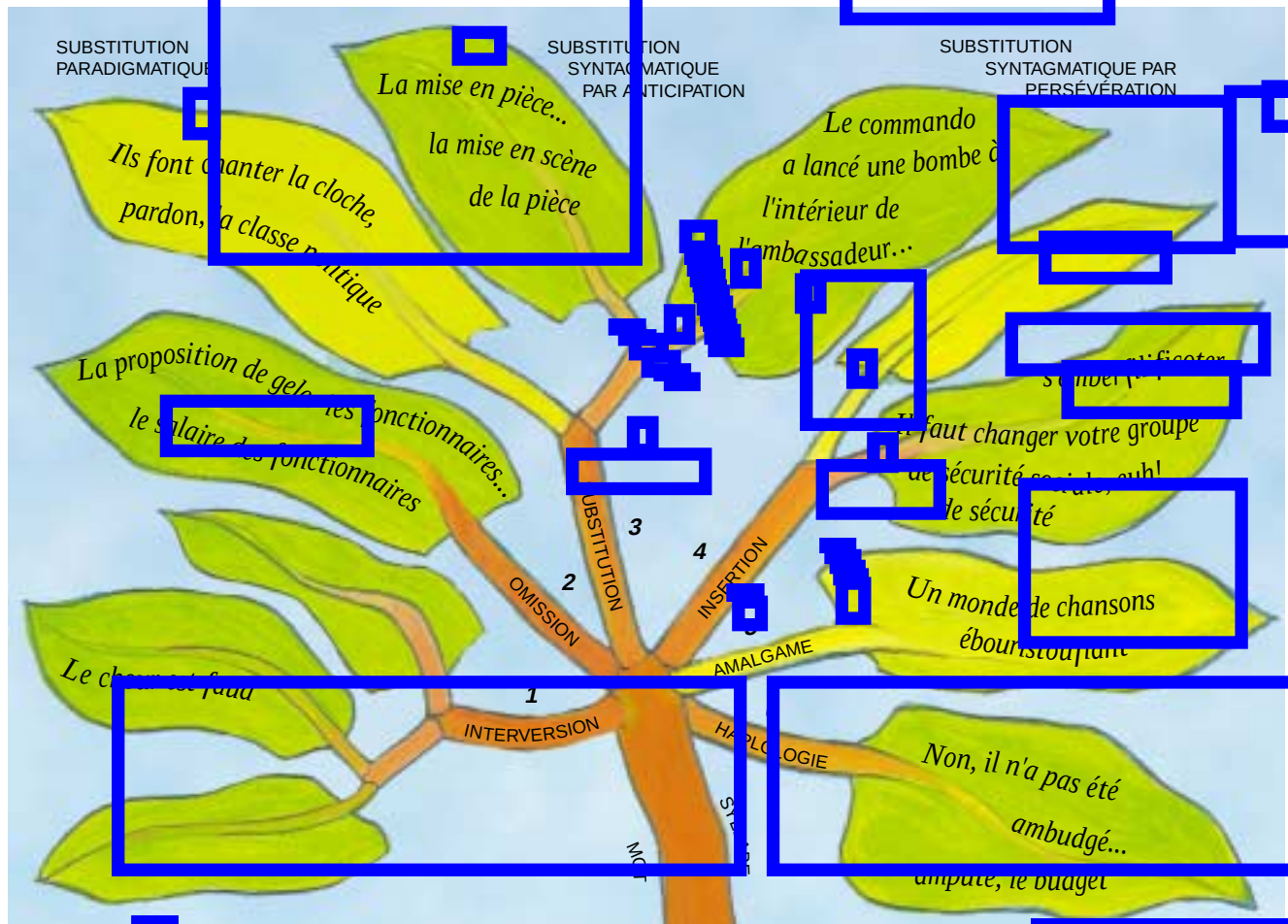
Au contraire, dans la phrase *Le commando a lancé une bombe à l'intérieur de l'ambassadeur, pardon, de l'ambassade*, l'origine du lapsus se trouve à gauche, dans la séquence déjà produite (c'est la finale de *intérieur*). Il s'agit d'une substitution par persévération. Quelle est l'origine de la substitution par persévération? Les psycholinguistes ont mis en évidence l'existence, à côté de la mémoire à long terme, d'une mémoire de travail ou mémoire à court terme. Dans le langage, la mémorisation temporaire de ce qui vient d'être énoncé est nécessaire pour que la bonne formation de la parole soit contrôlée et pour que, si nécessaire, le message planifié ou produit soit corrigé. Cette

information présente dans la mémoire à court terme est à l'origine des erreurs par persévération : un terme parasite présent dans la mémoire à court terme est sélectionné par erreur. Les lapsus par persévération représentent une proportion notable des erreurs syntagmatiques, mais les lapsus par anticipation sont les plus fréquents (jusqu'à 70 pour cent). La dominance de l'anticipation résulte du fait que, dans la production de la parole, l'attention du locuteur est essentiellement orientée vers la planification des mots à venir.

Resumons les critères qui nous permettent de classer les lapsus. Les catégories comprennent les noms, les syllabes et les phonèmes. Puis viennent six types : les amalgames, les omissions, les interventions, les insertions et les substitutions. Chaque type est paradigmatique et/ou syntagmatique. Enfin, les lapsus

syntagmatiques sont définis par un critère de position : persévération ou anticipation.

Les erreurs de mots ne représentent que 30 pour cent des lapsus, les erreurs de syllabes environ 5 pour cent, les erreurs de phonèmes quelque 65 pour cent. Ces résultats concordent avec les chiffres fournis par les linguistes pour d'autres langues. La faible proportion relative des erreurs de mots tient au fait que le lexique est imposé par le message que le locuteur a planifié, et par la syntaxe. Contrairement aux mécanismes mis en jeu dans la planification du langage, l'activité conceptuelle est consciente : le locuteur contrôle le choix du lexique. La substitution d'un mot par un autre dénature le contenu du message et perturbe le dialogue, de sorte qu'il est bloqué avant sa production ou corrigé dès son apparition. Les substitutions lexicales



1. LES LAPSUS sont classés selon six types : les interversions (1) qui sont syntagmatiques, c'est-à-dire que l'origine de l'erreur vient du contexte. Les omissions (2) sont également syntagmatiques, puisqu'elles sont causées par l'anticipation induite d'un terme qui devrait venir plus tard. Les substitutions (3) et les insertions (4) sont syntagmatiques (feuilles vertes) ou paradigmatiques (feuilles jaunes) (l'origine de l'erreur est alors indépendante du contexte). Les substitutions syntagmatiques sont de deux types : les substi-

tutions par anticipation ou par persévération. Dans le premier cas, le mot qui devrait être prononcé (*scène*) est remplacé par un mot programmé plus loin dans la proposition (*pièce*). Au contraire, dans les substitutions par persévération, c'est un mot déjà prononcé et encore présent dans la mémoire à court terme (*intérieur*) qui influence sur le mot cible (*ambassade*). L'amalgame (une contraction de mots équivalents) est paradigmatique (5), l'haplogogie (un télescopage de mots programmés dans une séquence) est syntagmatique (6).

ne se produisent généralement qu'entre des mots d'une même catégorie syntaxique, un verbe remplaçant un verbe, par exemple. Cette contrainte syntaxique limite les erreurs de mots.

Le nombre élevé des lapsus de consonnes et de voyelles se conçoit aisément quand on sait que la programmation des phonèmes – ou programmation phonologique – et la production de la parole relèvent de mécanismes automatiques dont le locuteur n'est pas conscient. Les lapsus phonologiques passent parfois inaperçus, car les phénomènes d'illusion auditive et d'attention sélective masquent souvent l'erreur ; des lapsus tels que *agriculteurs* pour *agriculteurs*, *capitaine*, pour *capitaine*, ne perturbent pas le dialogue. À tel point que, parfois, le locuteur ne les corrige pas.

La proportion des substitutions entre consonnes et entre voyelles (respectivement 55 pour cent et 45 pour cent) est comparable à celle de l'occurrence des consonnes et des voyelles dans la parole (52 pour cent et 48 pour cent). Cette correspondance, analogue dans toutes les catégories linguistiques et dans toutes les langues étudiées, montre que la probabilité d'un lapsus est fonction de la fréquence d'occurrences des unités linguistiques (mots et phonèmes) dans la chaîne parlée. La substitution est le type le plus représentatif des lapsus.

Les omissions et les insertions sont très rares dans la classe des voyelles (2 pour cent), mais plus fréquentes avec les consonnes (37 pour cent). Cette anomalie résulte d'une contrainte linguistique : le français admet une

voyelle – et une seule – par syllabe, de sorte que les omissions et les insertions de voyelles sont très rares. En revanche, dans les erreurs de syllabes et de consonnes, nombreuses sont les omissions et les insertions qui perturbent les groupes de consonnes ou une partie de la syllabe sans violer les contraintes de bonne formation syllabique. Ainsi l'insertion de *r* dans *portraitiste* pour *portraitiste* réalise un groupe permis dans la langue. La répartition des omissions et des insertions par catégorie confirme que les lapsus sont soumis aux principes fondateurs des structures linguistiques.

Les mécanismes de production des lapsus

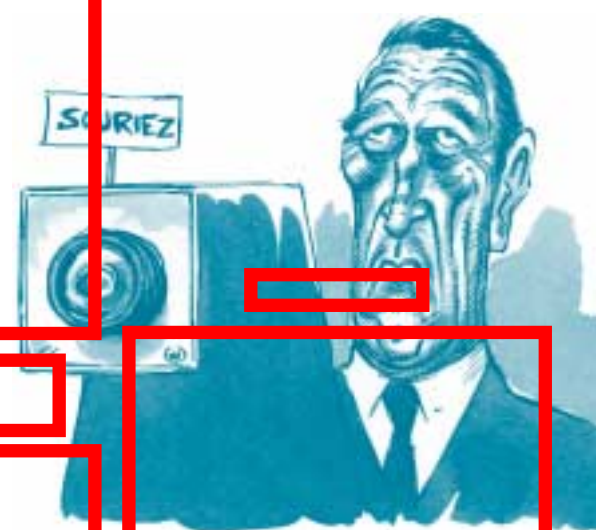
Si les lapsus sont soumis aux lois qui régissent les structures linguistiques, si par ailleurs le langage est planifié avant sa production, on s'interroge : par quelles aberrations les erreurs de langage sont-elles possibles ? La fatigue ou un repas arrosé suffisent-ils à expliquer ces déviations quand on sait que la production du langage dérive de processus automatiques inconscients ?

Pour répondre à ces questions, nous identifions les mécanismes mis en œuvre dans la production de la parole. Les deux principales théories sont, d'une part, la théorie sérielle de Willem Levelt, directeur de l'Institut Max Planck de psycholinguistique de Nimègue, et, d'autre part la théorie interactive de Gary Dell, professeur de psychologie à l'Université d'Urbana. Nous résumerons ces deux théories en insistant sur celle de W. Levelt, que notre étude semble valider.

Selon W. Levelt, les mécanismes de production de la parole sont strictement hiérarchisés. Le niveau supérieur est celui du module conceptuel. Après la phase de conceptualisation, le module de sélection lexicale donne accès aux lemmes, une catégorie de termes abstraits, présents dans un vaste dictionnaire et dotés d'un contenu sémantique et de propriétés morphologiques et syntaxiques. Ainsi le lemme *arbre* est l'équivalent du contenu sémantique du mot *arbre*, doté des propriétés morpho-syntaxiques : nom, singulier, masculin, etc. La sélection du lemme active le module de codage phonologique qui donne accès au lexème, c'est-à-dire au mot qui contient toutes les informations relatives aux consonnes, aux voyelles, à la structure syllabique et à l'accentuation.



Geler les fonctionnaires, euh! le salaire des fonctionnaires.



Le portraitiste

Chaque module traite une information particulière, et elle seule ; l'activité du module phonologique, par exemple, ne saurait être modifiée par un dialogue avec les modules situés en amont ou en aval : le module phonologique et le module conceptuel n'interagissent pas. Le codage phonologique aboutit à la construction des syllabes, puis à l'articulation, c'est-à-dire à la parole (voir la figure 2). Les étapes qui suivent la sélection lexicale (deuxième niveau) préparent l'organisation concrète de la parole pour l'articulation. L'origine des lapsus est toujours située en amont du module phonétique d'articulation.

Nous avons souligné que les lapsus ne peuvent pas violer les contraintes de bonne formation phonologique et syllabique. Examinons les exemples suivants : *C'est une idée à pieuser* (piocher / cueurer) ; *La caméra de France Toir* (France Toir / France Soir) ; *Les chiraquiens et les ballarquiens* (chiraquiens / balladuriens). Selon W. Levelt, seul le mot qui reçoit l'activation la plus forte active le module phonologique. Toutefois, dans le cas de l'amalgame, le module phonologique reçoit des modules supérieurs deux mots activés avec la même force ; le module de codage phonologique est aveugle et ne peut interroger directement les modules supérieurs, conceptuel et lexical, pour choisir. Le compromis trouvé respecte le nombre de syllabes de l'un au moins des prétendants et la structure des groupes consonantiques du français (même si le mot recréé par le lapsus n'existe pas dans la langue).

Dans le lapsus *Les chiraquiens et les ballarquiens*, les *balladuriens* auraient pu l'emporter, mais les *chiraquiens* représentent des concurrents sérieux ; un compromis a été trouvé avec *ballarquiens*, qui respecte le nombre de syllabes de l'intrus *chiraquiens*, déjà codé, et les contraintes phonologiques du

module : *ballaraquiens* aurait été possible, mais ne respecterait pas le nombre de syllabes de l'intrus. Le traitement est effectué sur la base des règles et contraintes propres au module phonologique, sans aucune interférence avec le dictionnaire disponible ni avec les dispositifs situés en amont.

En fait le modèle de W. Levelt n'est pas exclusivement sériel, car l'information est traitée en parallèle : dès qu'un module est libre, il traite l'information qui continue à lui parvenir. Lorsqu'une séquence est prête à la sortie du module phonétique, la parole peut commencer, même si le message n'est pas complètement traité par l'ensemble des modules. Les interruptions dans les lapsus sont donc traitées par le module de sélection lexicale tandis que l'information en parallèle sur au moins deux phrases.

Modèle sériel ou interactif?

Si le modèle sériel est une sorte de construction à deux étages, l'étage conceptuel-lexical et l'étage phonologique, entre lesquels il n'y a pas de dialogue, celui de G. Dell est une construction dont tous les modules interagissent. L'information n'est pas encapsulée, comme dans la théorie sérielle, mais elle circule entre les différents modules, dans les deux sens. Un dialogue constant s'instaure entre les diverses sources d'information : l'information est rétropropagée du niveau phonologique vers les niveaux lexical et conceptuel. Toutes les liaisons entre les modules sont bidirectionnelles (voir la figure 2).

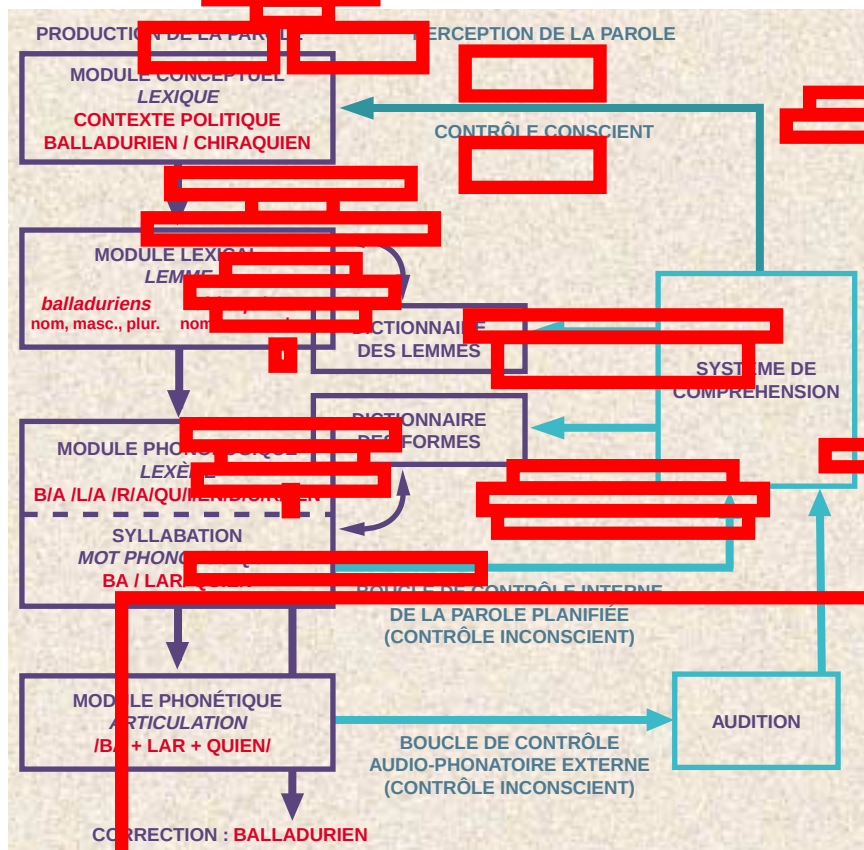
Reprenons le lapsus *La caméra de France Toir* pour illustrer le fonctionnement possible du modèle interactif.

À l'échelon conceptuel, l'information sémantique permet d'activer *Trois* qui est attendu dans *France Trois*. Le niveau conceptuel active également, comme dans le modèle sériel, les lemmes apparentés soit par le sens, tels les synonymes soit par la situation ou par le contexte. Ainsi *Soir*, qui est associé à *France France Soir*, l'est également à *Trois*. Toutefois, dans ce modèle, tous les lemmes mis en éveil passent, quel que soit leur degré d'activation, dans le module phonologique, tandis que, dans le modèle sériel, seul le lemme le plus actif y aurait abouti.

Dans le modèle interactif, le dialogue est permanent entre les modules conceptuel, lexical et phonologique, en d'autres termes entre le sens et la forme. Ainsi *Trois* active par rétropropagation des mots apparentés, tels que *toit, moi, foi*, etc., du niveau lexical, lesquels activent à leur tour les phonèmes *t, m, f...* La consonne *t*, présente deux fois dans le module phonologique (*t, tr*) est renforcée : l'amalgame *Toir* est alors possible. Selon G. Dell, trois catégories particulières de lapsus, les malapropismes, les erreurs mixtes et l'effet lexical, valident sa théorie.

Les lapsus de Miss Malaprop

Le malapropisme dérive du nom d'un personnage d'une comédie de Sheridan, dramaturge anglais du XVIII^e siècle, Miss Malaprop. Elle y est décrite comme une personne qui utilise mal propos (où son nom) des mots dont elle ne connaît pas le sens, mais qui ressemblent par la forme au mot juste qu'elle aurait dû utiliser. Dans la bouche de Miss Malaprop, les malapropismes ne sont pas des lapsus ; ils s'apparentent aux impropriétés et aux contresens déjà mentionnés (*déflagration*, pour *dépravation*). Toutefois, le terme désigne une classe de lapsus qui ont l'apparence des impropriétés proférées par Miss Malaprop. *Un immeuble de la périphérie, en ! de la périphérie ; Comment allez-vous rélever le fromage... le chômage ? Les allocations non, les allocutions du président. Ainsi, le malapropisme est une erreur entre deux mots phonologiquement parents, mais sans lien sémantique : péripétie et la même nombre de syllabes que périphérie, des voyelles rangées dans le même ordre, et deux syllabes initiales identiques. Pourtant, ces mots n'ont pas le même sens et ne sont pas associés dans la situation créée par le dialogue.*



2. DANS LE MODÈLE SÉRIEL, les modules de production de la parole (conceptuel, lexical et phonologique) sont activés de l'amont vers l'aval et uniquement dans ce sens. L'erreur dérive des modules où deux concurrents, ici *chiraquien* et *balladurien*, sont activés avec la même force. L'amalgame intervient dans le module phonologique. Parallèlement à la voie de production de la parole (en bleu), une voie de la perception (en vert) exerce un contrôle de la parole planifiée et produite. La production du module phonologique (la parole planifiée) est contrôlée grâce à une boucle de rétrocontrôle interne inconsciente : les propositions planifiées sont examinées dans un système de compréhension qui, par consultation des dictionnaires internes de lemmes et de formes, vérifie la validité de la parole planifiée. Normalement, le discours auto-contrôlé avant émission ne contient pas d'erreur. Pourtant, en cas de lapsus, la parole articulée et perçue par l'ouïe est comparée aux mots des dictionnaires internes et corrigée inconsciemment quand la boucle de rétrocontrôle se ferme sur les modules de la sélection lexicale ou phonologique. La correction est consciente quand la boucle se referme sur le module conceptuel.

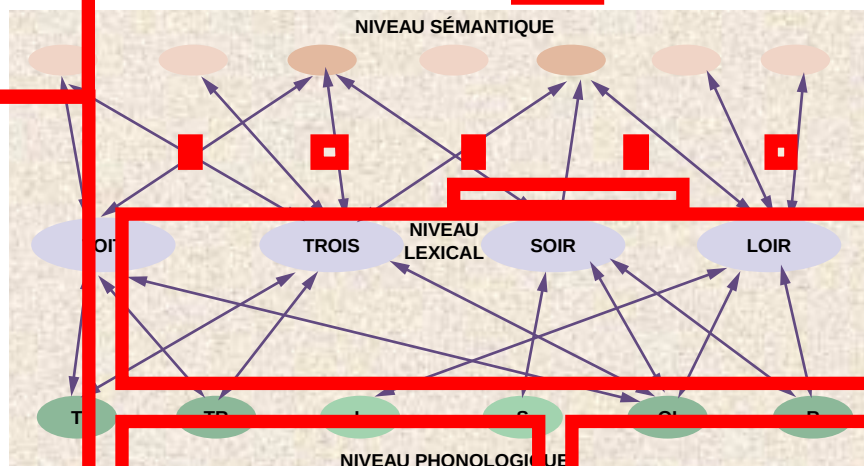
Les erreurs qualifiées de mixtes, telles que *Il y a des tueurs, euh ! des tireurs d'élite sur les toits. Il a montré une autre façade... façade de sa recherche* sont des substitutions entre deux mots phonologiquement, mais aussi sémantiquement parents. Enfin, l'effet lexical est le mécanisme par lequel le résultat d'une erreur phonologique tend à être un mot de la langue plutôt qu'un non-mot. Ainsi l'*opéra Bastille* devient l'*opéra Pastille* plutôt que l'*opéra Rastille*.

Dans la théorie interactive, les malapropismes et les erreurs mixtes naîtraient des mêmes mécanismes que ceux mis en jeu dans le lapsus *France Toir*. La probabilité d'une erreur mixte augmente quand le concurrent est un parent de la cible à la fois par le sens et par la forme. L'effet lexical s'expliquerait par la rétropropagation de l'information phonologique vers le niveau lexical qui agit comme un filtre favorisant les mots présents dans le dictionnaire : *Pastille* est ainsi préféré à *Rastille*.

Quel modèle doit-on privilégier : le sériel ou l'interactif ? En fait, nous pensons, avec W. Levelt, que plusieurs arguments valident le modèle sériel : la sélection d'un mot est trop rapide pour que le choix soit réalisé parmi tous les lemmes activés dans le modèle interactif ; de multiples rétroactions fragiliseraient le système et conduiraient à un nombre d'erreurs bien supérieur à celui qui est attesté dans une communication normale ; les catégories de lapsus qui semblent militer en faveur de la théorie interactive, tels les malapropismes et les erreurs mixtes, auraient en fait leur origine à l'extérieur des modules de production de la parole du modèle sériel, dans le « moniteur postlexical », une boucle de rétroaction interne qui contrôle la production du module phonologique (voir la figure 2).

Les boucles d'autocontrôle

Les modules d'élaboration de la parole représentent la « voie de production » ; l'autocontrôle exercé par le moniteur, dans le modèle sériel, emprunte la « voie de perception » ; c'est un mécanisme inconscient. La voie de perception est parallèle à la voie de production de la parole. Ainsi, reprenons l'exemple de l'*opéra Pastille*. La boucle interne, à la sortie du module phonologique, active le système de compréhension ; ce dernier donne accès soit aux dictionnaires des formes et des lemmes, soit au module conceptuel. Si, pour des



3. DANS LE MODÈLE INTERACTIF, les différents niveaux de production de la parole interagissent. On pourrait ainsi expliquer l'origine du lapsus *France Toir* à la place de *France Trois*. Les termes *France* et *Trois* activent tous les nœuds apparentés du niveau lexical (par exemple, *trois* active *trois*, *toit*, *soir*, *foire*, *loir*, etc.). Ces nœuds lexicaux activent à leur tour les nœuds phonologiques *t*, *tr*, *oi*, etc. Le lapsus *Toir* est alors possible. Toutefois, un tel mécanisme de production de la parole entraînerait un nombre d'interférences et, par conséquent, de lapsus bien supérieur à ce que l'on constate en réalité.

raison diverses, par exemple parce que le temps disponible pour le contrôle est insuffisant, seul le dictionnaire des formes est activé : *Pastille* est validé puisque c'est un mot usuel. Pendant l'articulation du lapsus, la boucle externe de rétroaction auditive permet au locuteur de s'entendre (c'est l'effet d'auto-audition que l'on surtake dans les laboratoires de langue) et de contrôler ce qui est dit. Cette boucle externe est responsable de la correction, la plupart du temps consciente, des lapsus articulés qui ont échappé à la vigilance du moniteur.

Jusqu'ici, nous avons raisonné comme si les malapropismes, les erreurs mixtes et l'effet lexical étaient des erreurs de langage fréquentes. En fait, d'après notre corpus de 4 000 lapsus, si les malapropismes sont fréquents (27 pour cent environ), les deux autres types de lapsus sont bien moins fréquents. Une analyse statistique montre qu'ils pourraient être dus au hasard). De plus, les malapropismes, substitutions de deux mots totalement étrangers par les sens, confirmeraient l'hypothèse sérielle, selon laquelle le module phonologique ne dispose pas de l'information sémantique. Ces trois catégories de lapsus sont de « fausses preuves » du modèle interactif.

Nous pensons que le modèle sériel rend compte de tous les aspects des lapsus et, par conséquent, de la production du langage. Le moniteur postlexical (la voie de la perception inconsciente de la parole) assure la rétroaction de contrôle qui devrait éviter les erreurs,

mais qui est, parfois, mise en défaut : les lapsus résultent d'« accidents » dus à un manque d'attention, à la fatigue, à la rapidité du débit, à la rareté de certains catégories linguistiques remplacées par de plus fréquentes, à l'effet du contexte ou de la situation, au fonctionnement de la mémoire, à l'intrusion d'un distracteur pendant que nous parlons, etc.

Enfin, les mécanismes qui expliquent les lapsus du français sont également ceux qui ont été établis pour d'autres langues, quelle que soit leur structure linguistique. Les contraintes, propres à chaque langue et que les lapsus respectent, modifient certains aspects des lapsus, mais les mêmes mécanismes sont à l'œuvre partout, prouvant l'unicité fondamentale de la faculté de langage.

Mario ROSSI est professeur émérite à l'Université de Provence.

G.S. DALL, *A spreading-activation theory of retrieval in sentence production*, in *Psychological Review*, vol. 3, pp. 3-23, 1986.

M. ROSSI et E. PETER-DEFARE, *Les Lapsus*, éditions PUF, 1998.

WIM LEVELT et al., *A theory of lexical access in speech production*, in *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 22, pp. 1-75, 1999.

J. SEGUI et L. FERRAND, *Leçons de parole*, éditions Odile Jacob, 2000.

Le corpus des lapsus recueilli par les auteurs est disponible sur le site :

<http://www.lpl.univ-aix.fr/lpl/personnel/rossi/mariorossi.htm>

Ces si délicats instruments de verre

JEAN-CLAUDE LÉPAGES

Les verres que l'on fait vibrer ont un son spécifique, « cristallin », qui a plu à de nombreux compositeurs. La faible puissance de ces instruments et leur fragilité les ont fait disparaître des orchestres, mais des innovations récentes mettent en valeur leurs qualités musicales.

Le son éthéré du verre fascine les mélomanes depuis des siècles et a suscité l'invention d'instruments de verre variés. Le plus simple est la cloche en verre, que l'on fait résonner par percussion. Plus élaboré, l'euphone émet des sons quand le doigt frotte une tige de verre horizontale, excitant des vibrations dans une tige métallique verticale, reliée à la tige de verre. Dans la grande famille des instruments de verre, l'harmonica de verre est sans doute le plus connu : il est composé d'un axe horizontal qui porte, en boîtes, des cloches de diverses tailles ; l'exécutant fait tourner l'ensemble, tandis que ses doigts mouillés, posés sur le bord des cloches, les font vibrer par frottement, comme on fait vibrer, à la fin des repas de famille où l'on s'ennuie un peu, un verre en frottant son bord.

Le son du verre semblait avoir des vertus psychologiques. Le compositeur et facteur allemand Karl Leopold Röllig, qui joua de l'harmonica de verre et composa pour lui, accordait ses sons le pouvoir de ramener l'amitié entre des amis : « Il se jetait sur moi en pleurant et il me demandait d'arrêter ; alors, j'embrassais pleins d'amitié et de passion. » Il s'inquiète aussi de cette faculté : « Ce que peut devenir un harmonica dans les mains d'un superstitieux ou d'un truand, je ne peux l'imaginer. »

Les « musiciens de verre » espéraient élever l'âme de leurs auditeurs : « Je serais très heureux de pouvoir ajouter un peu à leurs joies secrètes et célestes », écrit le musicien allemand Johann Christian Müller en 1780.

Pourquoi le verre a-t-il un son si remarquable ? Et comment le son est-il produit ? A Londres, en 1761, quand Ann Ford publie une méthode et des œuvres pour des jeux de verres musicaux, elle s'étonne : « La seule musique dont nous entendez l'effet sans connaître la cause. » Nous ne perdrons pas en poésie ce que nous gagnerons en compréhension de l'acoustique des instruments de musique en verre et

nous verrons que cette analyse conduit à des modifications des instruments classiques et à l'introduction d'instruments nouveaux.

Cloches et verres percutés

Depuis au moins le XIII^e siècle en Chine et depuis le XV^e en Europe, des musiques sacrées et profanes sont exécutées sur des cloches de verre. Certains jeux de cloches étaient même organisés comme les carillons, avec des claviers qui commandaient des maillets percuteurs. On fabriquait ces instruments autour de la Bohême, qui fut l'un des principaux centres de verrerie d'art jusqu'à la fin du XVIII^e siècle.

Quand les verriers anglais inventèrent le cristal, en ajoutant de l'oxyde de plomb à un oxyde de silicium purifié, la transparence du nouveau matériau augmenta (l'oxyde de fer contenu dans le sable donne souvent une coloration brunâtre ou verdâtre). Le verre de Bohême perdit sa prééminence en verrerie générale, mais il fut utilisé en facture instrumentale : pour les verriers, ce type de verre est le « sonore », il émet un son moins riche, mais plus puissant que le cristal.

Longtemps, la percussion a été seule employée : lors de la percussion, on écarte une partie de l'objet de sa position d'équilibre. Si la déformation

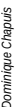


1. BENJAMIN FRANKLIN jouant de son « harmonica » de verre.

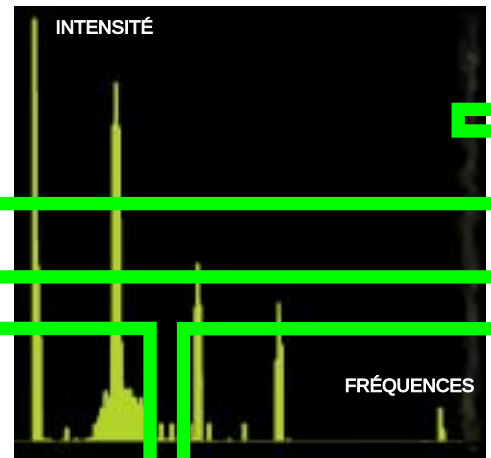
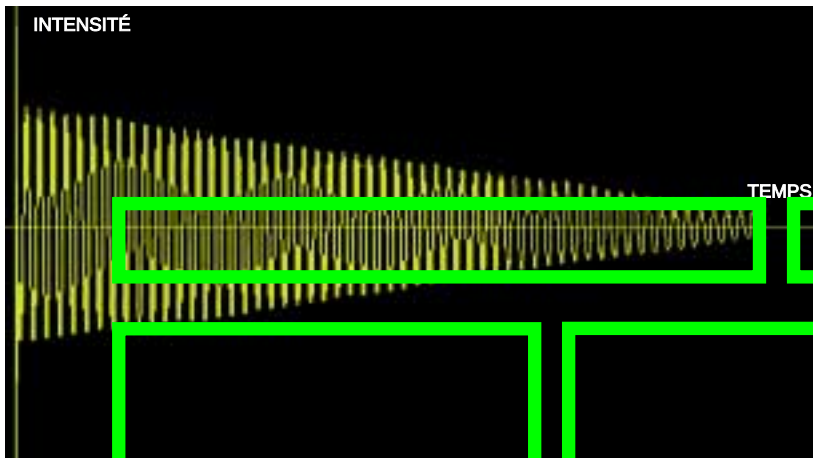
Ainsi, le choc sur la paroi de la cloche de verre déforme toute la cloche, qui se met en vibration selon plusieurs modes de flexion. Quand l'ouverture est circulaire, le mode de déformation le plus simple est une transformation du cercle en ellipse, qui s'écrase ensuite en une ellipse perpendiculaire à la première, et ainsi de suite. Ces principes sont bien connus des fondeurs de cloches métalliques d'église : pour favoriser certains modes de déformation, donc certaines fréquences, ils ajustent les épaisseurs (et donc les rigidités) sur différentes sections de la cloche, particulièrement au sommet et à la base. Les fréquences retenues font la personnalité des cloches.

En revanche, leur timbre fait leur personnalité. Ce timbre est déterminé par le type de vibrations qui mettent l'air en mouvement. Si le signal sonore était parfaitement sinusoïdal, une seule fréquence serait émise. Les solides vibrent rarement selon une seule fréquence, mais selon un mode de déformation compliqué. Cette déformation, nous le savons grâce aux travaux du mathématicien français Joseph Fourier (1768-1830), peut être décomposée en une somme d'ondes sinusoïdales à des fréquences multiples de la fréquence de base, dite fon-

La prise en compte des transitoires est essentielle dans le cas des instruments de verre percutés, car ils sont associés à des phénomènes perceptibles. Par exemple, quand on heurte un barreau de verre, le choc engendre aussi bien des vibrations perpendiculaires à la longueur, comme celles d'une



et le vibraphone (7). Le séraphin (8) et l'harmonica de verre (9) sont frottés. Dans l'euphone (10), le frottement d'une tige de verre excite des tiges métalliques.



3. LE SON D'UN INSTRUMENT tel que l'harmonica de verre est un signal quasi périodique (à gauche) où l'on distingue à l'œil les basses fréquences. On analyse les timbres des instruments de

musique en examinant leur spectre, c'est-à-dire l'amplitude du son aux diverses fréquences (à droite). Ici le spectre d'une note d'harmonica de verre est surtout riche en premiers harmoniques.

corde de violon, que des vibrations perpendiculaires à la largeur du barreau ; comme le son d'une corde courte est plus aigu que le son d'une corde longue, les ondes sonores dues aux vibrations perpendiculaires à la largeur du barreau sont rapidement amorties, mais leurs fréquences sont bien supérieures. De ce fait, on entend un crissement initial avant d'entendre la vibration harmonieuse du barreau, qui résulte des vibrations perpendiculaires à sa longueur.

L'extinction du son, d'autre part, caractérise également le timbre des instruments de verre ; la note fondamentale s'installe immédiatement (clarté et «couleur») et perdure, disparaissant lentement et régulièrement (impression de «halo», de «suspension»...). En outre, un sentiment d'«élévation» provient sans doute du nombre de fréquences émises sur un spectre large s'étendant vers les aigus. Ces fréquences ont des intensités qui diminuent régulièrement : la lecture des sonagrammes donne une sensation d'équilibre que confirme l'écoute.

Parfois les sonagrammes montrent certains défauts : une mauvaise fusion du mélange verrier ou une forme «vrillée» de la cloche au soufflage créent des parties non harmoniques. L'émission de ces derniers est courante dans les plaques percutees, et, parfois, les facteurs favorisent même leur émission afin d'enrichir le spectre. Le risque est que, s'ils n'ont pas été recouverts par la série harmonique, des battements pénibles pour l'oreille ne se fassent entendre.

Gênés par la fragilité des cloches de verre percutees, les musiciens et les fac-

teurs d'instruments cherchèrent des modifications qui pallieraient les mal-adresses des exécutants. La succession natale des biens d'un prince d'Autriche signale ainsi l'existence d'un jeu de cloches percutees par des maillets qui étaient mis en mouvement par un clavier sur une sorte de célesta à cloches.

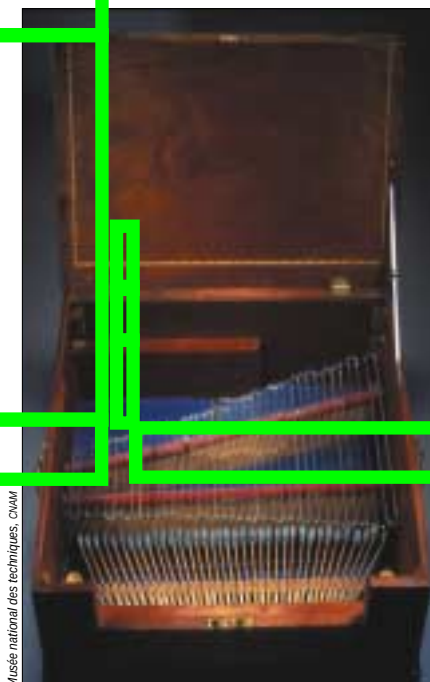
L'évolution vers l'harmonica

Plus tard apparurent le cristalophone, qui est un vibraphone à lames de verre, et le glacechord, un piano à «cordes de verre» (ces «cordes» sont en fait des lames ou des barres) qui fut inventé

par le Français M. Beyer vers 1780. Dans le glacechord, un clavier actionne des marteaux qui frappent des lames de verre. L'impératrice Joséphine en eut un dans son salon de musique. Hector Berlioz, qui le nommait l'«harmonica à clavier», écrivit pour l'instrument sa première version de *La tempête*. Camille Saint-Saëns lui donna une partie très caractéristique dans *L'aquarium*.

Dans ces deux instruments, le spectre sonore est complexe, car la lame oscille dans les trois dimensions (y compris en torsion). Elle est frappée par-dessus dans le vibraphone, et par-dessous dans le glacechord. La masse volumique et l'élasticité du verre en définissent les propriétés mécaniques et, donc, acoustiques ; on accorde les deux instruments en ajustant la longueur, l'épaisseur ou le diamètre des lames ou des barres.

Une autre voie est explorée à partir du XVI^e siècle : la mise en résonance des verres par frottement. Si Galilée cite les verres (des verres à boire) mis en vibration par frottement, c'est à titre d'expérience de physique et non à titre musical. Toutefois, en 1673, le père jésuite Athanasius Kircher (qui s'intéressait aux aimants, aux éclipses, à la lanterne magique qu'il semble avoir inventée, aux volcans...) évoque les verres musicaux dans un de ses ouvrages. Puis, en 1747, l'Irlandais Richard Puckridge installe des tins musicales un jeu de verres qu'il accorde en les remplissant plus ou moins et avec lesquels il interprète des œuvres en frottant les bords avec les doigts mouillés. Il nomme son instrument «orgue angélique» ; aujourd'hui on le nomme aussi séraphin ou vérillon.



4. UN CYMBALUM DE VERRE du Conservatoire national des arts et métiers, à Paris.

Une cloche de verre frottée se déforme de la même façon qu'une cloche percutée, mais la mise en mouvement est différente : le principe d'entretien des vibrations sur un verre que l'on fait chanter est comparable à celui de l'archet sur la corde du violon ; c'est celui du *coller-glisser* (*stick-slip*). Le violoniste enduit les crins de l'archet de colophane (une résine) avant de jouer ; le joueur d'harmonica de verre, lui, mouille ses doigts. Lorsque l'archet entre en contact avec la corde, l'adhérence (*stick*) fait qu'il entraîne celle-ci, jusqu'au moment où la force d'adhérence devient inférieure à la force qui rappelle la corde en arrière : la corde glisse (*slip*). L'archet ou le doigt continuent leur mouvement, ils accrochent de nouveau la corde, qui est de nouveau entraînée, et ainsi de suite.

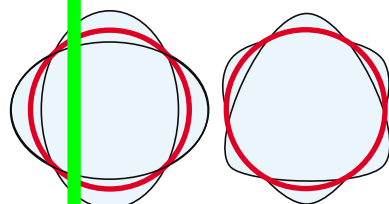
La friction du bord supérieur d'une coupe excite la fréquence propre la plus basse de la coupe (le fondamental). Comme pour la cloche, diverses fréquences sont émises lors de l'attaque, mais l'entretien de la vibration rend le fondamental prééminent. Une impression musicale de « pureté » et de « richesse » se dégage. Cette richesse peut être un souci pour l'instrumentiste : alors qu'il attaque une note, un manque d'eau ou bien une pression ou une vitesse d'entraînement inappropriées font parfois sonner plus fortement l'une des fréquences harmoniques. Cet effet, que l'exécutant cherche évidemment à éviter, n'est jamais bien grave, car les harmoniques restent dans des rapports harmoniques. La richesse en fréquences permet de rendre plaisants des rapports de notes qui seraient désagréables sur d'autres instruments, l'oreille pouvant rechercher au sein des spectres de deux notes très rapprochées, les rapports qui apaisent les tensions internes de l'accord. Ce principe de mise en vibration engendre les timbres qui enthousiasment les auditeurs. La tessiture va du *sol* à 97,99 hertz au *do* à 1 046,5 hertz, soit quatre octaves et une tierce (de la note basse du baryton à la note aiguë de la soprano, elle est comparable à celle d'un violon alto qui émettrait davantage vers les graves).

Les musiciens ont créé pour le séraphin des méthodes et des œuvres. Gluck (1714-1787), par exemple, en sera un bon interprète. Le répertoire exécuté est constitué d'œuvres originales, d'adaptations de musique religieuse et d'airs à la mode. Cette tradition de musique religieuse sur séraphin se

maintiendra dans les pays anglosaxons durant tout le XIX^e siècle.

Toutefois, si les timbres enchanteur, les difficultés d'interprétation et les limites techniques restreignent le jeu. Ainsi on fait difficilement tourner le doigt à vitesse régulière sur les verres immobiles. De surcroît, au XVIII^e siècle, l'accordage résulte d'un remplissage partiel des verres : le liquide modifie les vibrations, parce qu'il augmente l'inertie du système, et vous pouvez vous convaincre que plus le verre est plein, plus la note émise est basse. Ce type d'accordage présente des inconvénients : comme le liquide s'évapore l'exécutant doit réaccorder souvent l'instrument ; en outre, le jeu est limité en tessiture, car, quand on emplirait le verre, il « sonne » moins (la surface d'oscillations est réduite) et le timbre s'appauvrit.

La fabrication de verres préalablement accordés et toujours vides évite cet inconvénient, mais le jeu reste difficile : avec le séraphin, on ne peut exécuter des accords que de six notes, et avec difficulté.



5. LES VERRES FROTÉS des séraphins et des harmonicas, tout comme les cloches de verre, sonnent parce qu'ils se déforment périodiquement, après qu'on les a écartés de leur position d'équilibre. Plusieurs modes de vibration sont simultanés (en haut, on en a représentés deux : les verres oscillent entre les deux courbes noires). La photographie inférieure montre, à l'aide d'eau placée dans une coupe, comment cette dernière vibre quand on l'excite par « glisser-coller ».

Bernardin Franklin perfectionne alors l'instrument. Rédacteur de la constitution des États-Unis, Franklin est aussi l'inventeur du paratonnerre, de chemins de fer, de verres à double foyer et de dispositifs d'éclairage, critique musical et compositeur ; il fréquente assidûment les concerts, ainsi que le salon de Mme Brillon de Jouy. Fasciné par le timbre du séraphin, il décide d'en rendre l'emploi plus musical en résolvant un à un les problèmes que celui-ci pose à l'interprète et au compositeur.

Franklin, inventeur de l'« armonica »

Tout d'abord, il accorde des cloches (ainsi, il n'y a plus à réaccorder l'instrument en cours de jeu par la hauteur d'eau), qu'il assemble les unes dans les autres, de sorte que l'on puisse exécuter des accords de dix notes. Il installe cette succession de cloches sur un axe qui fait tourner l'instrumentiste, tandis qu'il pose les doigts mouillés sur les cloches qui se mettent en vibration par friction. Franklin décide de nommer cet instrument « armonica », en hommage à la musique italienne et à la musicalité de la langue italienne.

L'armonica peut être réalisé différemment de celui de Franklin, et avec des matériaux variés : des instruments chinois nommés timbres sont aussi demi-sphériques, mais en laiton, et des bols tibétains fonctionnent sur le même mode de mise en vibration grâce à une batte en bois frottée sur le pourtour supérieur. Le président américain Thomas Jefferson, au XVIII^e siècle, fabriquait un « bellarmonie » selon le même principe que l'armonica, mais avec des cloches en métal ; elles peuvent également être de porcelaine (le timbre serait différent).

Comment créer les diverses notes ? Dans le cas du violon, l'accordage s'effectue par une modification de la longueur ou de la tension de la corde. Dans l'armonica, c'est le constructeur qui accorde, en changeant la taille des cloches ou leur rigidité. La fréquence propre augmentant avec la rigidité de la structure, on rend les sons émis plus aigus quand on épaissit les parois ou quand on réduit le diamètre ; inversement, on obtient des sons plus graves en amincissant les parois ou en augmentant le diamètre des cloches.

Les cloches de verre de l'harmonica sont mises en vibration par glisser-coller, comme les verres musicaux, mais, en raison du frottement sur le côté et non sur le bord supérieur, ou « buvant », la mise en vibration se fait plus lentement : dans le séraphin, l'attaque de la cloche de verre sur le buvant est plus efficace, car il est plus facile de déformer un bord libre. L'allegretto, que l'on obtient sans difficulté avec le séraphin, est inaccessible à l'harmonica (à qualité de verre équivalente, car certains verres « accrochent » mieux que d'autres).

En revanche, dans l'harmonica comme dans le séraphin, les sons sont durables : même après le retrait des doigts, les verres mis en vibration continuent de sonner, et des effets de vibrato sont possibles ; un crescendo résulte naturellement de l'excitation entretenue, et un vibrato de hauteur est obtenu quand on fait descendre et monter le doigt le long de la paroi (ce que l'on ne peut pas faire avec le séraphin).

Au total, le timbre vaporeux, angélique de l'harmonica charma Mozart, Beethoven, Pleyel, et bien d'autres compositeurs, poètes et artistes, qui composèrent pour lui. Goethe disait que l'harmonica lui parlait le « langage du cœur du monde », et Paganini s'exclamait : « Ah ! quelle voix ! Cela est vraiment fait pour prier... » Les pièces sont souvent écrites pour « Pianoforte ou Clavichord harmonica », d'où, d'ailleurs, une difficulté à retrouver le répertoire original. Nombreuses sont les œuvres qui restent à découvrir.

L'harmonica dans le tumulte électronique

Avant l'avènement des moyens électroniques d'amplification, l'harmonica était peu sonore : le gain en possibilités de jeu dû à l'emboîtement des cloches réduit la puissance de jeu, parce que les ondes sonores émises par une cloche sont absorbées et déviées par les cloches voisines. Par exemple, pour enregistrer, on doit mettre le microphone sur le côté des cloches ; en bout d'axe, il capte très mal...

Aussi, malgré un son plus « moelleux », « somptueux »,

l'harmonica disparut progressivement. Il était concurrencé par le piano, auquel on avait adapté une pédale de *forte*, rendant l'instrument plus puissant et plus expressif. De surcroît, à la fin du XVIII^e siècle, les habitudes d'écoute musicale avaient changé : les orchestres jouaient dans des salles plus grandes, et, dans les orchestres, les instruments à vent couvraient le chant de l'harmonica. Certes, son timbre plaisait aux âmes romantiques, mais il s'adaptait mal à l'évolution des mœurs et des goûts. Fragile, coûteux, de fabrication complexe et difficile à jouer, il était accusé d'être néfaste à la santé mentale (le médecin allemand Franz Anton Mesmer l'employa dans ses séances d'hypnose et a été responsable de cette mauvaise réputation.)

Alors que l'harmonica déclinait, d'autres instruments employant le verre apparurent. Par exemple, dans les années 1780, l'acousticien allemand Ernst Chladni (1756-1827) inventa d'abord le clavicylindre, où les tiges de métal sont frottées par un rouleau de verre. Puis il mit au point l'euphone, où l'exécutant frotte une tige de verre horizontale, qui pointe vers lui ; cette tige communique sa vibration à une tige de métal accordée. C'est donc le timbre du métal que fait entendre cet instrument. Comme pour les jeux de

verres musicaux, le doigt adhère et glisse ; ce mouvement anime la tige de verre d'une oscillation longitudinale et de bas en haut.

Chladni trouva le principe de cet instrument alors qu'il étudiait les fréquences émises par une tige métallique. Il avait initialement installé le système sur des tampons en liège et sur une caisse en bois, de sorte que les pertes d'énergie acoustique étaient considérables : le son qui en sortait était très faible. Dans les années 1960, les frères François et Bernard Baschet ont élargi les possibilités d'expression de l'instrument en installant le système sur une plaque de duralumin et en y ajoutant des cônes d'amplification. Le spectre ainsi obtenu est celui d'une note « pure » avec un fondamental très développé et bien défini, les cônes donnant des effets de réverbération que l'on utilise pour régler la puissance de jeu et enrichir le timbre.

L'universalité des instruments de verre

Tous les pays qui ont fabriqué du verre ont façonné des instruments dans ce matériau : en Inde du Sud, on pratique le jalatharang depuis des siècles ; les Polonais, les Belges, les Turcs ont fabriqué des trompettes har-

moniques en verre... Dans tous les cas, les verres utilisés étaient à base d'oxyde de silicium et d'autres éléments qui abaissaient la température de fusion : des carbonates de calcium, de potassium, des oxydes d'aluminium, pour les verres les plus courants ; du carbonate de potassium seulement dans le sonore.

Pour examiner la grande variété des instruments de verre, reprenons la classification générale des instruments de musique selon leur mode de production du son, le mode d'exécution et la facture. Dans la vaste classe des instruments à percussion, on distingue les idionphones (frappés, nincés, frottés) et les membranophones (percussions à peau), les cordophones, les aérophones et les instruments électroniques. La plupart peuvent être construits avec du verre, mais ce matériau n'est



6. LE SÉRAPHIN est le premier instrument où fut utilisé le principe du glisser-coller. Pour accorder les verres, on devait initialement les emplir partiellement d'eau, mais l'évaporation de cette dernière faussait le jeu. On préfère aujourd'hui préaccorder les verres en amincissant leurs parois à la meule.

pas toujours intéressants : une trompette en verre n'a pas de qualité musicale particulière ; un violon de verre stimule l'imagination, mais, en raison de la multiplication des mouvements vibratoires des cordes et de leur transmission par un chevalet, le gain est nul.

À la famille des idiophones appartiennent la majorité des instruments de verre. Ils produisent des sons par leurs propres vibrations sans le concours d'une colonne d'air, d'une membrane ou d'une corde. Le harmonica, le sérénade, le balafon, le xylophone et le glacechord se servent du verre comme cornes vibrant et comme cornes résonnantes.

Parmi les cordophones, la trompette marine fait usage du verre : une corde unique est tendue sur un chevalet

Le verre frotté et le bruit du ruban adhésif

Pourquoi le verre frotté vibre-t-il ? A cause du phénomène de glisser-coller, ou *stick-slip*. Ce principe d'émission sonore agit dans des situations variées : quand on joue du violon, quand on fait glisser le doigt sur une surface mouillée, quand on tire de son dévidoir un morceau de ruban adhésif ou quand on rompt un solide. Examinons d'abord ce dernier cas.

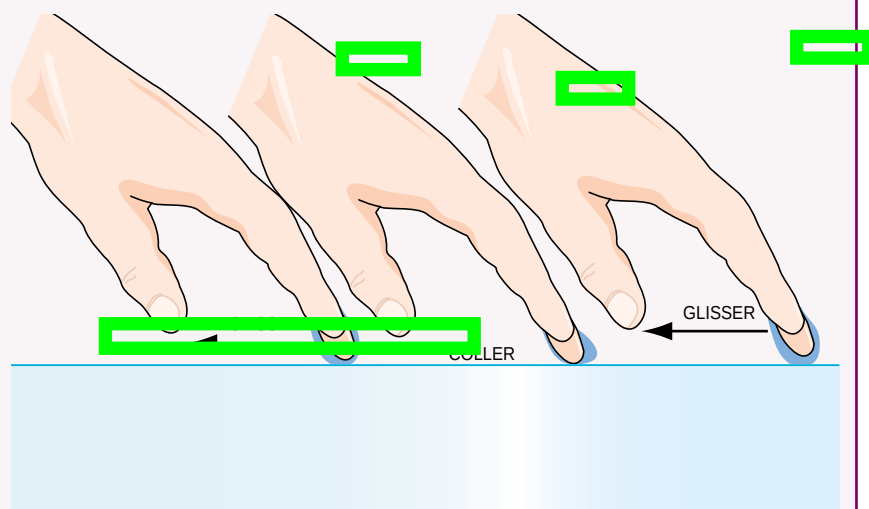
Rompre un solide, c'est créer une fissure à partir d'un défaut préexistant, et provoquer la propagation de cette fissure. Cette propagation consomme de l'énergie, car il faut briser les liaisons interatomiques. L'énergie est apportée sous la forme d'une contrainte qui déforme d'abord le matériau dans les limites de son élasticité. Quand les liaisons chimiques qui assurent la cohésion du matériau sont rompues, la fissure apparaît tandis que l'énergie des liaisons est brusquement libérée. La vitesse de propagation de la fissure dépend de la différence entre le taux de restitution de l'énergie et l'énergie superficielle, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons chimiques. Pour un matériau idéalement élastique, la fissure accélérerait jusqu'à atteindre la vitesse des ondes de Rayleigh (soit la vitesse du son). Toutefois, pour les matériaux réels, une partie de l'énergie

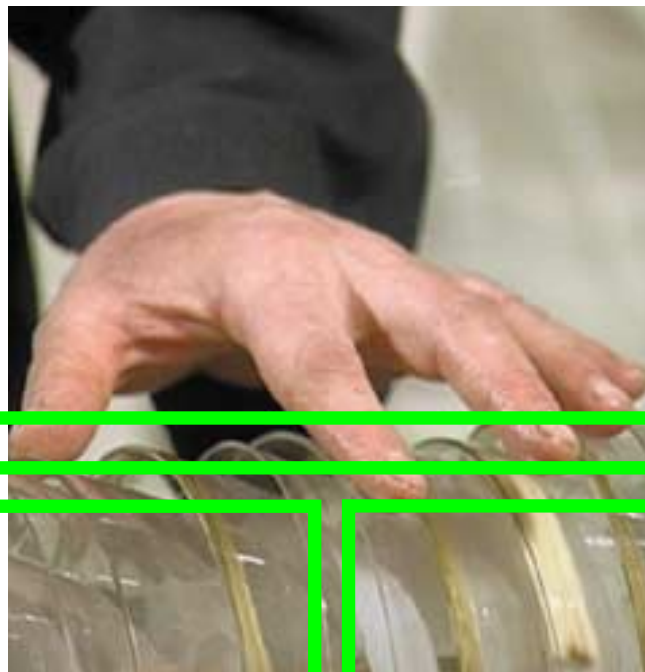
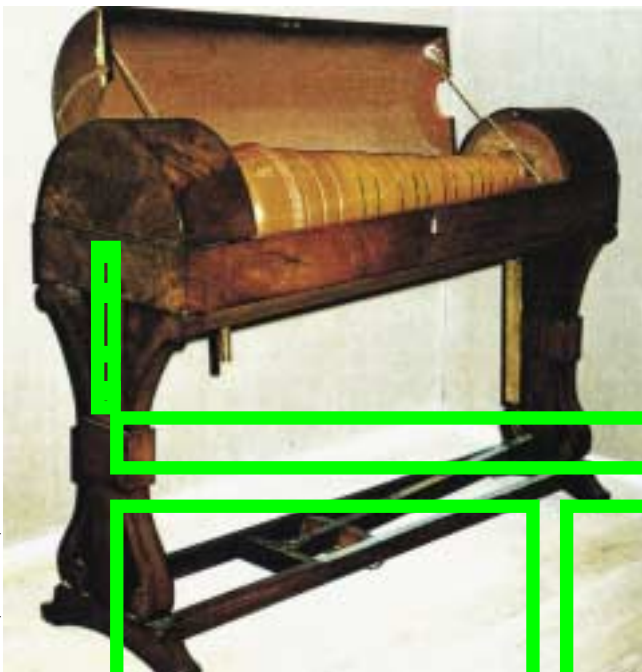
est perdue, notamment sous forme acoustique. De ce fait, la propagation de la fissure cesse momentanément, avant de reprendre quand la contrainte est redevenue suffisante.

On peut étudier le *stick-slip* à l'aide d'un dévidoir automatique de ruban adhésif, que l'on couple à un système qui mesure la force de tirage du ruban. Les expériences, bien interprétées par un modèle théorique, montrent que les oscillations sont sinusoïdales ou en dent de scie, selon l'inertie du système.

Dans le cas des verres frottés, le phénomène est du même type, mais compliqué par la présence du liquide. Quand le doigt est mouillé (l'eau entre par capillarité dans les interstices de la peau), l'eau facilite le glissement. Toutefois, le déplacement du doigt laisse de l'eau sur le verre par le même phénomène que celui qui fait qu'un pinceau dépose de la peinture sur un mur (la vitesse d'un liquide est nulle au contact d'un solide). Après s'être déplacé sur une courte distance (glisser), le doigt est sec, de sorte qu'il ne glisse plus ; c'est la phase du coller. Puis l'eau environnant la zone sèche revient, par mouillage, humecter le doigt, et le glissement reprend.

Michel BARQUINS, E.S.P.C.I.





7. HARMONICA DE VERRE DU XVIII^e SIÈCLE ; l'axe qui porte les cloches de verre est entraîné par un pédalier. L'instrument a été modernisé : un moteur électrique entraîne maintenant les cloches, tandis qu'un brumisateur maintient les doigts humides.

mobile qui ne s'appuie que d'une jambe sur la caisse de résonance. Lors de la mise en vibration de la corde, cette jambe percute périodiquement une petite plaque de verre, engendrant un son sec. L'effet obtenu quand on ne joue que les notes harmoniques sur la corde est celui d'un cor ou d'une trompe d'écluse. Cette plaque peut être également en métal ou en ivoire : le facteur d'instruments choisit le matériau selon le timbre qu'il souhaite donner à l'instrument.

Les aéophones dont la structure comporte du verre sont plus variés : des facteurs ont construit des orgues en verre avec des tuyaux fermés, comme la flûte de Pan en verre), des flûtes traversières (tuyau ouvert), des trompes d'écluse, des embouchures de clarinette et des saxophones de verre. Ces instruments (de construction difficile) sont superbes, et l'emploi de mélanges verriers pour leur réalisation se justifie par la très faible dilatabilité des verres d'oxydes. Les flûtes métalliques, par exemple, ont l'inconvénient de s'allonger ou de se raccourcir selon les variations de températures (de la pièce, de l'instrument chauffé par l'exécutant) : les facteurs doivent généralement construire le corps de ces instruments en plusieurs morceaux, que l'on enfonce plus ou moins les uns dans les autres. Ayant observé cette faible dilatation des verres, au début du XIX^e siècle,

le facteur français Claude Laurent eut l'idée de les employer pour construire ses belles flûtes de cristal ; aujourd'hui, d'autres verres peuvent être mis en œuvre à cette même fin. Cette faible dilatation a intéressé certains facteurs de flûte de Pan ou d'orgues. Ces derniers employèrent des bouteilles selon le principe des flûtes globulaires, faisant vibrer la colonne d'air interne à la cavité à partir du jet de l'air sur un rebord de bouteille. Les bouteilles étant de tailles différentes, on obtenait des notes différentes.

À la famille des idiophones appartiennent les harmonicas, séraphins, cloches de verre examinées, et aussi d'autres instruments, qui ont été inventés après la Renaissance. Par exemple, des cristallophones (vibraphones à lame de verre) furent perfectionnés. L'euphone, lui, se sert du verre comme corps excitateur. Au sein de ce groupe d'instruments, les verres musicaux et l'harmonica occupent une place à part : avec la science musicale, ce sont les seuls instruments qui émettent par friction des sons de hauteurs différentes et déterminées. Le facteur de séraphin ou d'harmonica, qui n'est pas limité à l'utilisation de verres à boire, peut explorer des formes variées, qui facilitent le jeu, améliorent le timbre et augmentent la puissance sonore. Pour ces optimisations, il doit tenir compte de l'excitation particulière qui est mise en œuvre : les frottements du buvant,

dans le séraphin, ou de la zone plane qui joue et se buvant pour l'harmonica, engendrent des sons différents. Ce qui est recherché ici, c'est un timbre « chaud et rond », et le son entretenu qui permet d'explorer de nouveaux horizons sonores par des notes maintenues.

D'autres améliorations sont possibles : par exemple, j'ai motorisé l'instrument (qui était naguère actionné par un système de pédalier) et l'ai équipé d'un brumisateur qui conserve l'exacte humidité des doigts de l'instrumentiste.

On comprend aujourd'hui les causes des vibrations inédites des instruments de verre, mais la compréhension des phénomènes physiques n'épuise pas la poésie qui se dégage des timbres variés et rares, de cet instrumentarium. Le public contemporain ressent toujours la « nouveauté » et la richesse d'expression de ces instruments.

Jean-Claude CHAPUIS est musicien, compositeur et facteur d'instruments. Il a créé l'ensemble *Transparences*, où figurent des instruments décrits ici, à côté d'instruments plus connus.

Daniel MOUGIS et Michel BARQUINS, *Stick Slip and Peeling of Adhesive Tapes*, in *Adhesion*, vol. XII, pp. 205-222, K.W. Allen, Elsevier, Londres, 1988.

John PIERCE, *Le son musical*, Éditions Belin-Pour la Science.

La surveillance du climat

MICHAEL KING • DAVID HERRING

Un satellite qui embarque cinq groupes de capteurs collecte les données nécessaires à la prévision des évolutions climatiques.

Le satellite *Terra* survole notre planète à 705 kilomètres d'altitude. Chaque jour, il surveille les phénomènes qui déterminent le climat : les nuages, la croissance des végétaux, les variations du rayonnement solaire, la formation des glaces... Dans son orbite autour de la Terre, en passant par les pôles, il observe toutes les régions qui traversent son champ de vision et il dresse un état de santé du Globe.

Aujourd'hui, l'atmosphère et la biosphère se transforment avec une rapidité sans précédent dans l'histoire de la Terre. Chaque année, on allume des centaines de feux de forêts pour défricher : cette pratique a quadruplé au cours du XX^e siècle. On brûle en moyenne 42 000 kilomètres carrés de forêt tropicale par an, soit l'équivalent du quart de la surface de la France. Certains capteurs de *Terra* détectent les flammes, d'autres mesurent l'étendue des terres brûlées ou observent les déplacements des fumées et des gaz émis dans l'atmosphère. Grâce à la haute résolution de l'un de ses capteurs (15 mètres), *Terra* localise même les braises qui risquent de repartir en flammes. Il fait partie du Système d'observation de la Terre (SOT) de la NASA, un ensemble de satellites qui surveillent le climat global, afin de comprendre l'influence des facteurs naturels et humains et de prédire les changements futurs.

Depuis la formation de la Terre, il y a 4,5 milliards d'années, les bouleversements géologiques, telles les éruptions volcaniques, les variations des courants marins et les cycles de glaciations ont modifié la surface des terres émergées, ce qui a transformé le cli-

mat. Aujourd'hui, l'activité humaine est le principal facteur de changement (voir *Modifions-nous le climat ?*, par Thomas Karl et Kevin Trenberth, *Pour la Science*, janvier 2000).

Pour prévoir ces variations, un grand nombre de mesures, dans le monde entier, sur une période prolongée doivent être collectées et prises en compte dans les simulations. Nous avons identifié 24 facteurs principaux qui influent sur le climat, notamment les flux d'énergie entre la surface de la Terre et l'atmosphère (les rayonnements visible et infrarouge), les concentrations en gaz à effet de serre, la couverture de neige et de glace, les nuages, les aérosols, les changements de végétation, etc. Le satellite *Terra* mesure 16 de ces facteurs (voir la liste page 78).

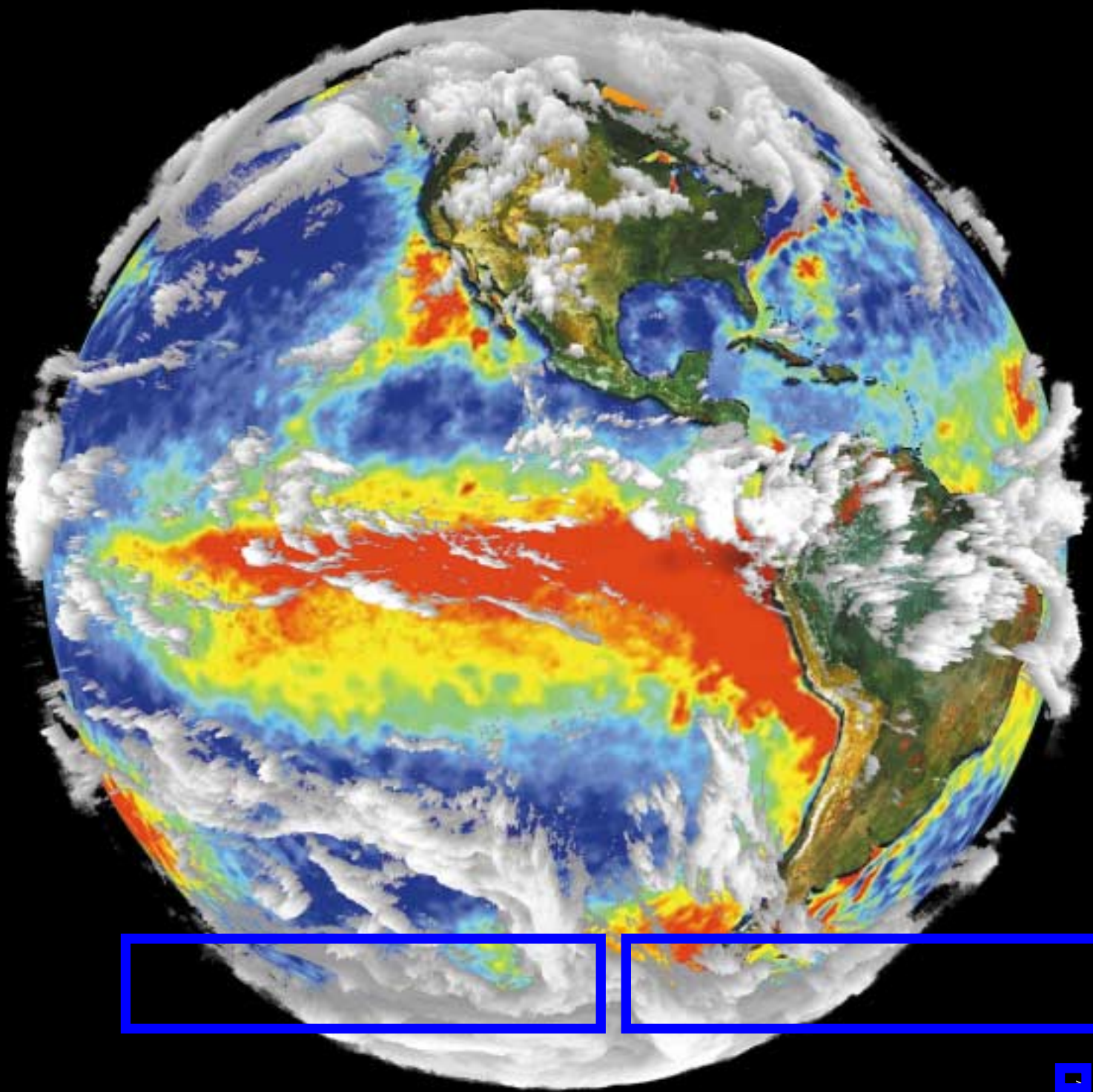
En 1983, la NASA avait proposé le lancement d'un satellite de surveillance du climat global, qui collecterait ces données fiables en nombre suffisant (voir *La Terre vue du ciel*, par Diane Evans, Ellen Stofan, Thomas Jones et Linda Godwin, *Pour la Science*, février 1985). En 1991, le programme SOT fut déclaré, un budget de 44 milliards de francs fut alloué pour une durée de dix ans. La construction et le lancement de *Terra*, le satellite du SOT le plus récent, a coûté 55 milliards de francs.

Une nouvelle génération de systèmes de mesure

Depuis son lancement, le 18 décembre 1999, *Terra* est commandé depuis le Centre de Greenbelt, dans le Maryland. Contrairement aux instruments qui émettent des rayons laser ou des

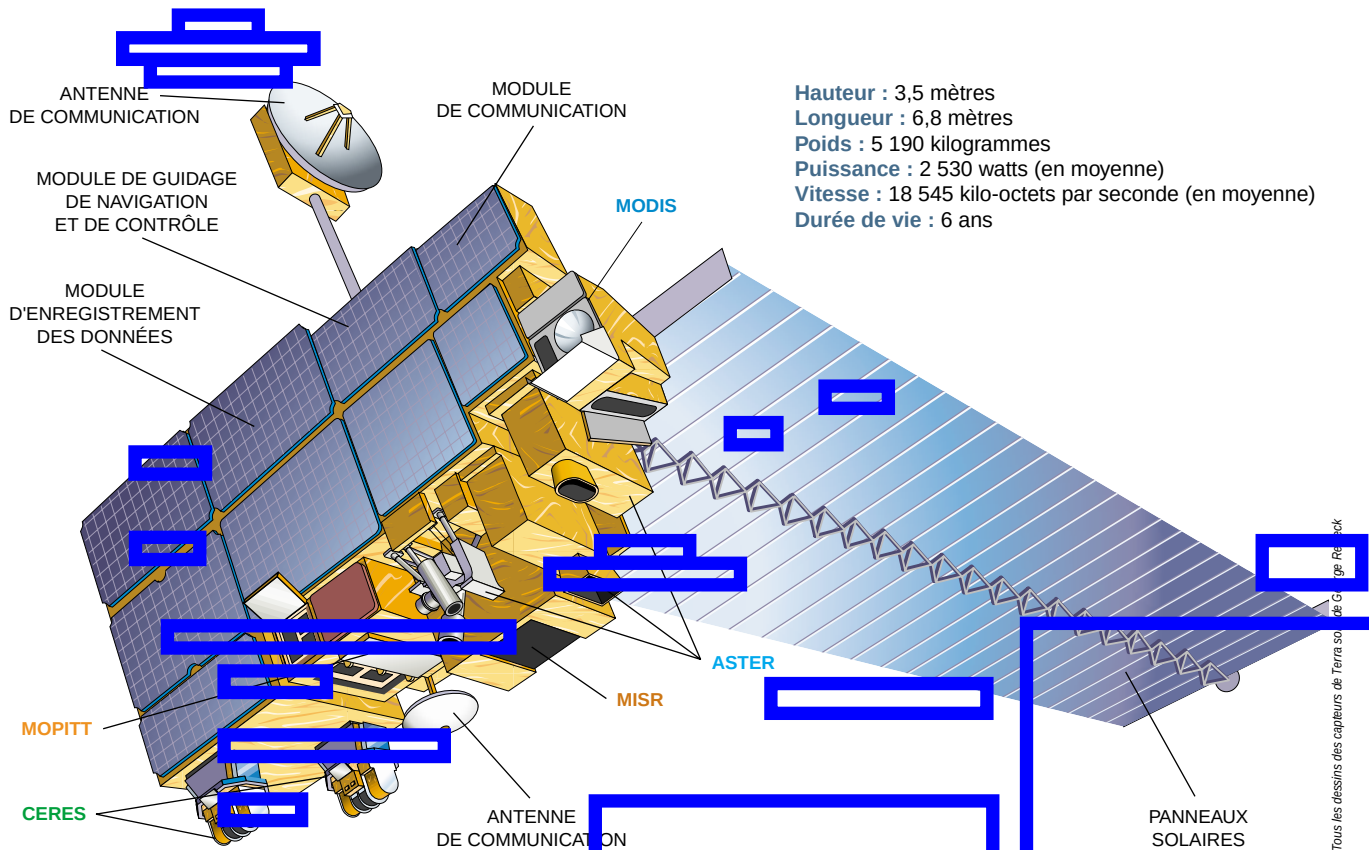
faisceaux radar, puis qui analysent leur réflexion sur la surface de la planète, les systèmes de mesure de *Terra* sont passifs. À la manière de caméras numériques, ils mesurent l'intensité de la lumière qui sort de l'atmosphère. Des détecteurs sont sensibles aux différentes plages de longueurs d'onde. À partir de la lumière visible on forme alors des images qui sont de véritables photographies. À partir des rayonnements infrarouges et ultraviolets, on forme des images en « fausses couleurs ».

Chaque jour, les satellites du SOT envoient sur Terre des dizaines de millions de méga-octets de données. Celles-ci sont traitées par ordinateur, mémorisées, puis interprétées par une équipe de 350 scientifiques du monde entier. Jusqu'à présent, les données collectées par satellite n'étaient accessibles qu'aux organismes qui disposaient d'un budget suffisant pour les acheter. Les satellites *Landsat*, dont le premier date de 1972, produisent des images qui coûtent chacune des milliers, voire des dizaines de milliers de francs. En revanche, certaines données de *Terra* seront accessibles à toute personne en possession d'une station de réception adéquate et d'équipements capables de traiter et de mémoriser les informations. Les données sont exploitables commercialement : les cartes des zones océaniques de haute productivité intéressent les entreprises de pêche, car ce sont les plus poissonneuses ; grâce aux images des cultures, les agriculteurs identifient les terres les plus riches, les zones de ruissellement des eaux, etc., et ils peuvent améliorer l'irrigation et l'amendement des champs.



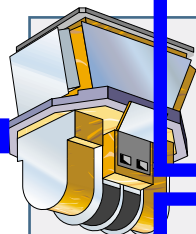
L'ÉTAT CLIMATOLOGIQUE DU GLOBE est analysé par le satellite Terra, lancé en décembre 1999. Des satellites plus anciens ont enregistré les données correspondant à cette image de synthèse, qui montre la végétation (en vert sur les continents), les feux de forêts (en rouge sur les continents), la température des

océans (croissante du bleu au rouge, en passant par le vert et le jaune) et la couverture nuageuse. Les eaux chaudes qui s'accumulent sur l'Ouest de l'Amérique du Sud, dans l'océan Pacifique (en rouge), sont dues à un système périodique de courants océaniques nommé El Niño.



PARAMÈTRES MESURÉS PAR TERRA

-  AÉROSOLS
-  TEMPÉRATURE
-  NUAGES
-  FEUX
-  GLACIERS
-  TEMPÉRATURE DE L'EAU
-  ÉROSION
-  CATASTROPHES NATURELLES
-  PRODUCTIVITÉ DE L'OcéAN
-  TEMPÉRATURE DE L'AIR
-  POLLUTION
-  BILAN RADIATIF
-  COUVERTURE DE GLACE SUR LES OcéANS
-  COUVERTURE NEIGEUSE
-  VÉGÉTATION
-  VAPEUR D'EAU



CERES

Paramètres mesurés :



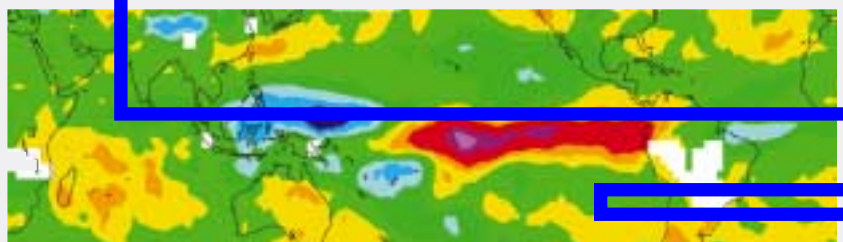
Caractéristiques :

CERES est le seul système embarqué sur un satellite qui mesure les flux radiatifs dans toute l'atmosphère.

Systèmes de mesure : deux radiomètres à balayage, sur un large domaine spectral.

Résolution spatiale : 20 kilomètres.

CERES est l'acronyme de *Clouds and the Earth's Radiant Energy System*, soit «système de mesure des nuages et du bilan radiatif de la Terre». Pour prédire les variations des températures moyennes, on doit d'abord comprendre les échanges d'énergie entre la surface de la Terre, l'atmosphère et l'espace. Aujourd'hui, on s'interroge sur le devenir de huit pour cent du rayonnement qui entre dans l'atmosphère. Cette fraction est-elle absorbée par les nuages et les aérosols (de petites particules de fumée et de poussière), puis dispersée dans l'atmosphère inférieure, où aucun satellite ne mesure les rayonnements ? Pour comprendre le rôle des nuages dans la circulation de l'énergie à la surface de la Terre, CERES mesure les rayonnements à la limite supérieure de l'atmosphère et à la surface de la planète, avec une précision deux fois supérieure à celle des satellites précédents. Les mesures de CERES compléteront celles d'ERBE, un satellite qui fut mis en orbite pendant les années 1980.

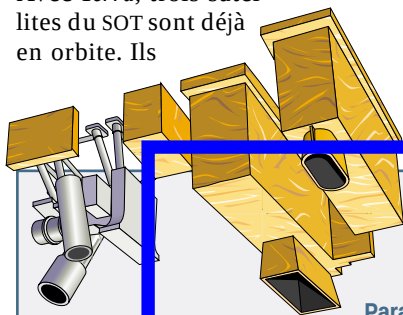


L'INSTRUMENT CERES a enregistré la plus grande variation jamais observée de rayonnement réfléchi, dans l'Est de l'océan Pacifique, en février 1998. Le phénomène El Niño a réchauffé ses eaux, entraînant une formation accrue de cumulo-nimbus qui ont alors piégé une plus grande quantité de la chaleur émise par l'océan et par la couche inférieure de l'atmosphère (en rouge).

Takmeng Wong, NASA Langley Research Center

Des yeux dans le ciel

Avec *Terra*, trois satellites du SOT sont déjà en orbite. Ils



mesurent les paramètres en rapport avec le climat global, telles la réflexion du rayonnement solaire ou la force des vents au-dessus des océans. Dans le cadre du SOT, 15 autres satellites doivent être construits et mis en orbite. Ils devraient récolter des données pen-

dant 15 ans : pour faire des prévisions précises en matière de climat, nous aurons besoin de mesures sur de longues périodes.

Avec les systèmes de mesure de *Terra* et des autres satellites du SOT, on identifiera les phénomènes qui

ASTER

Paramètres mesurés :

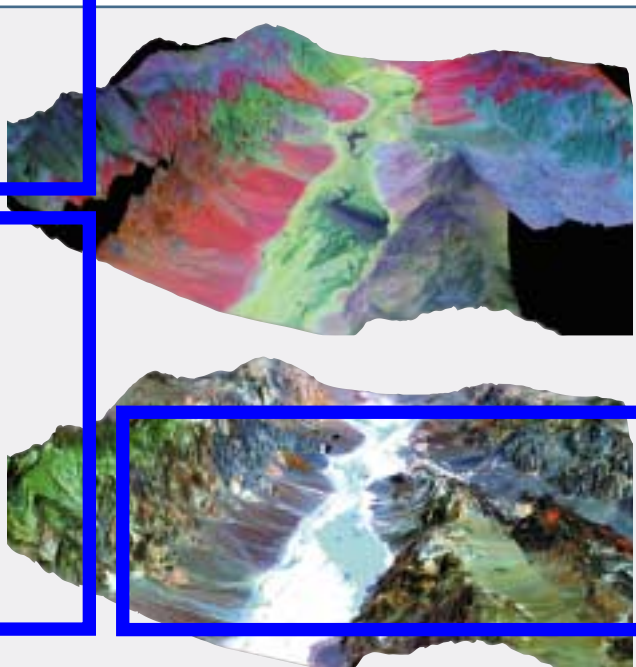


Caractéristiques : ASTER est le système de mesure de *Terra* qui a la meilleure résolution spatiale; on peut le pointer vers des cibles spécifiques.

Instrument : Trois systèmes orientables qui mesurent les longueurs d'onde dans le visible et l'infrarouge (proche, moyen et infrarouge thermique).

Résolution spatiale : de 15 à 90 mètres.

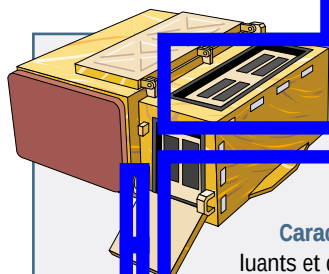
ASTER est l'acronyme de *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*, soit «radiomètre pour la mesure depuis l'espace des émissions thermiques et des réflexions de la lumière solaire». Les terres émergées émettent des rayonnements qu'ASTER mesure avec une très haute résolution. Grâce à ces données, on établira le bilan radiatif de la planète. On identifiera aussi la nature des roches, des sols et de la végétation qui émettent les rayonnements détectés : les agriculteurs comprendront comment les variations de température, le vent et le type de sol influent sur leurs cultures. ASTER surveille aussi le recul des glaciers et des calottes glaciaires, l'avancée ou le recul de la déforestation, les inondations et les feux naturels. Il aidera les climatologues à distinguer l'influence des facteurs naturels et humains sur le climat. Avec ses systèmes orientables, ASTER produit des cartes numériques plus précises que celles des satellites *Landsat*.



LES ROCHES ET LA VÉGÉTATION apparaissent en fausses couleurs sur ces images. Elles ont été prises par le satellite ASTER, qui a une largeur de 60 kilomètres de large, dans la Vallée de la Mort, en Californie. ASTER détecte le rayonnement thermique (en haut), révélateur de la nature de la surface terrestre locale : le rouge correspond à des roches riches en quartz et le vert clair à des dépôts de sels. Il détecte aussi le rayonnement thermique et infra-rouge (en bas) : le vert correspond à la végétation, le bleu à l'eau et l'orange aux roches volcaniques riches en fer.

MOPITT

Paramètres mesurés :



Caractéristiques : MOPITT détecte les polluants et détermine leur source.

Système de mesure : un radiomètre

à balayage qui utilise la spectrométrie par corrélation des gaz.

Résolution spatiale : 22 kilomètres.

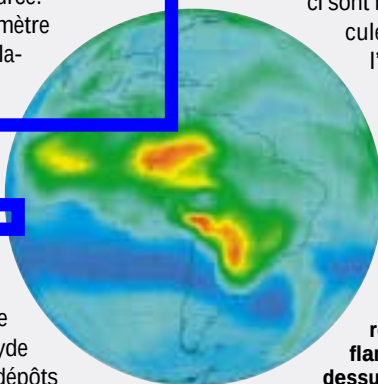
MOPITT (*Measurements Of Pollution In The Troposphere*, soit «mesure de la pollution dans la troposphère») mesure la concentration en méthane et en monoxyde de carbone dans la couche inférieure de l'atmosphère. Une molécule de méthane, un gaz à effet de serre, piège 30 fois plus de chaleur qu'une molécule de dioxyde de carbone. Les marécages, les animaux et des dépôts

solidifiés, sous le plancher océanique, sont des sources de méthane, mais on ignore combien de méthane est libéré dans l'atmosphère. La concentration en méthane dans l'atmosphère inférieure augmente au rythme d'environ un pour cent par an.

Le monoxyde de carbone produit par les industries, les automobiles et les feux de forêts réagit avec les radicaux hydroxyles, qui sont des «agents nettoyeurs naturels de l'atmosphère». Ces

ci sont moins nombreux pour réagir avec d'autres molécules, et le monoxyde de carbone empêche ainsi l'atmosphère de se débarrasser d'autres produits chimiques nocifs. MOPITT, le premier satellite à utiliser la spectrométrie par corrélation des gaz, distingue le méthane et le monoxyde de carbone des autres gaz, tels le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau.

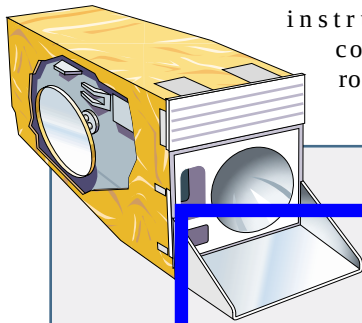
DU MONOXYDE DE CARBONE s'accumule au-dessus de l'Amérique du Sud. Les concentrations élevées en ce gaz (en rouge et en jaune) résultent des feux de forêt. Les vents d'Est soufflant autour de l'équateur transportent ces gaz au-dessus de l'océan Pacifique.



déterminent le climat. En comparant la déforestation à la pluviométrie et à la couverture nuageuse locales, par exemple, on comprendra comment la disparition des arbres perturbe le cycle de l'eau. Des mesures similaires faites avec différents instruments confirmeront la vali-

dité de leur étalonnage. Enfin, on comparera les mesures prises par des instruments des satellites du SOT et les instruments au sol ou embarqués sur des avions, des bateaux, des bouées... Le diagnostic du climat requiert des centaines d'heures de calcul par ordinateur : on devra attendre l'hiver prochain pour obtenir une nouvelle vision de la Terre, à partir des mesures de

Terra : les nombreuses années seront peut-être nécessaires pour la confirmer. Le climat de la Terre résulte de l'influence de nombreux facteurs qui dépendent les uns des autres. L'ensemble des mesures de Terra apportera une meilleure compréhension du système climatique et des prévisions plus fiables qu'aujourd'hui de l'évolution de notre climat.



MODIS

Paramètres mesurés :



Caractéristiques : MODIS prend des mesures qui couvrent la totalité de la planète en un à deux jours.

Systèmes de mesure : quatre ensembles de détecteurs sensibles aux rayonnements dont la longueur d'onde est comprise entre celle du visible et celle des infrarouges thermiques.

Résolution spatiale : de 250 mètres à un kilomètre.

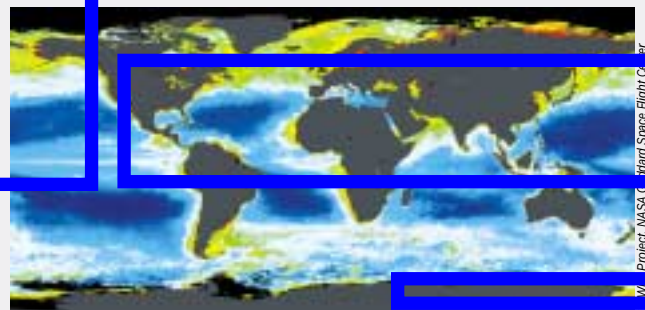
MODIS (*MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer*) est un spectroradiomètre à résolution modérée. Il observe la Terre dans 36 intervalles de longueurs d'onde distincts. Parmi les systèmes de mesure de Terra, c'est celui qui surveille le plus large éventail de paramètres climatiques. Il mesure presque tous les jours la proportion de la surface terrestre qui est couverte par des nuages, grâce au bannier d'un couloir de 2 330 kilomètres de large. Avec une telle couverture spatiale, complétée par les mesures de MISR et CERES, on déterminera l'impact des nuages sur le bilan énergétique de la planète. L'influence des nuages sur le climat reste mal connue. MODIS est le seul instrument qui mesure le rayonnement infrarouge autour de 1,375 micromètre. Il détecte aussi les cirrus cotonneux qui contribueraient au réchauffement global en piégeant la chaleur émise par la surface de la Terre. MODIS surveille aussi le mélange de panaches de fumée et des aérosols avec les nuages, qui modifient leur capacité à absorber et à réfléchir l'énergie.

MODIS détecte les étendues de neige et de glace qui se déposent pendant l'hiver ou pendant les tempêtes. Il observe la « vague verte » qui s'étend sur les continents au printemps, les éruptions volcaniques, les inondations, les cyclones, les sécheresses et les feux de forêts naturelles. Grâce à lui, on déplacera des populations menacées. Les capteurs de MODIS sont particulièrement sensibles aux feux : ils distinguent les feux à flammes des feux qui couvent et estiment la quantité d'aérosols et de gaz qu'ils libèrent dans l'atmosphère.

En surveillant les changements de la biosphère, MODIS améliorera notre compréhension du cycle du carbone. Aujourd'hui, aucun capteur embarqué sur un satellite ne mesure directement la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Cependant, MODIS quantifie l'activité photosynthétique des plantes et estime la quantité de gaz à effet de serre qu'elles absorbent. En outre, MODIS surveille la biosphère marine en mesurant la fluorescence de la chlorophylle dans l'océan (*figure ci-contre*).



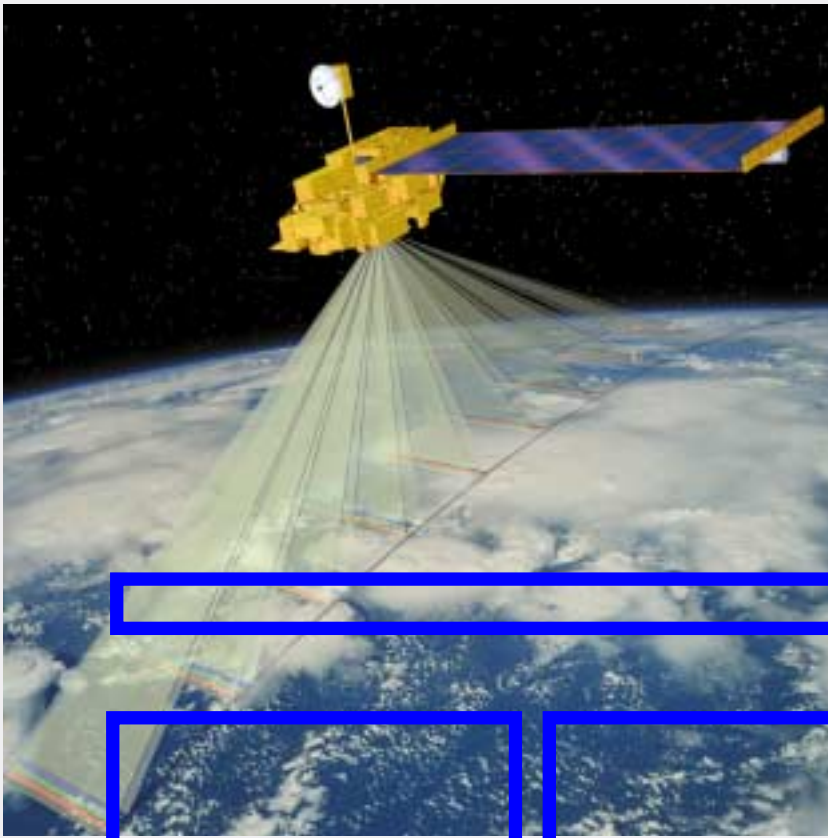
LA COUVERTURE NEIGEUSE, visible sur cette image prise par le satellite SeaWiFS, est l'un des innombrables facteurs climatiques mesurés par MODIS. En bas, on aperçoit la Floride.



LA CHLOROPHYLLE du phytoplancton modifie la couleur des eaux, ce qui permet à des satellites, tel SeaWiFS, d'évaluer son abondance (*en jaune, rouge et vert sur la figure*). MODIS va plus loin en surveillant l'intensité de la fluorescence des plantes, un paramètre révélateur de leur productivité.

Résolution spatiale : de 275 mètres à 1,1 kilomètre.

MISR (*Multiangle Imaging SpectroRadiometer*, soit «spectroradiomètre à visées multiples») reconstitue des images de la Terre en l'observant sous neuf angles distincts, en quatre couleurs (bleu, vert, rouge et infrarouge proche), à partir de la lumière solaire réfléchi par la planète. Grâce aux variations de cette lumière, d'un angle de vue à l'autre, on distingue différents types de nuages, d'aérosols et de surfaces terrestres. On combine les images MISR à l'aide de techniques stéréoscopiques pour créer des modèles en trois dimensions, afin de déterminer la source des aérosols et des panaches de fumée.



GRÂCE À NEUF VISÉES SIMULTANÉES, l'instrument mesure, par stéréoscopie, les interactions entre les aérosols, les nuages et les rayonnements.

Michael K. MCCOY est le directeur scientifique du Système d'observation de la Terre de la NASA ; David HERRING est le directeur de la communication de ce système.

Bruce A. WIELICKI, Robert D. CESS,
Michael D. KING, David A. RANDALL
et Edwin F. HARRISON, *Mission to
Planet Earth : Role of Clouds and Radia-
tion in Climate*, in *Bulletin of the Ame-*

n° 11, pp. 2125-2154, novembre 1995.

Claire L. PARKINSON, *Earth from Above: Using Color-Coded Satellite Images to Examine the Global Environment*, University Science Books, Sausalito, California, 1997.

Michael D. KING, *EOS Science Plan : The State of Science in the EOS Program*, NASA NP-1998-12-069-GSFC, 1998.

Le kayak aléoutien

GEORGE DYSON

Le kayak des Aléoutes était adapté à la vie de ces chasseurs de pleine mer. Aujourd'hui, les kayakistes s'interrogent encore sur les principes de sa conception raffinée.

Au début du XVIII^e siècle, lorsque les explorateurs russes atteignirent les îles aléoutiennes pour la première fois, ils virent de petits bateaux à proue fendue qui naviguaient sur une mer agitée et les nommèrent *baidarka*. Ces embarcations étaient faites de planches de bois assemblées par des fibres de fanon de baleine et recouvertes de peau de mammifères marins. Dans leurs kayaks légers, souples et rapides, les Aléoutes chassaient la baleine, la loutre, l'otarie ou le phoque avec des

lances et des harpons. Progressivement, les colons modifièrent la conception du *baidarka* pour l'adapter à leurs besoins. Certains modèles, tel le *baidarka* à proue en forme de gueule ouverte, étroit et très rapide, disparurent. La tradition orale de construction navale se perdit. Aujourd'hui, les chercheurs, les ingénieurs, les kayakistes et les Aléoutes s'interrogent : quelle était la vitesse de pointe des anciens *baidarkas*? Pourquoi avaient-ils une proue bifide et une poupe tronquée? Selon quels principes

les chasseurs aléoutiens les avaient-ils construits?

Peu de *baidarkas* subsistent, mais nous en avons reconstruit à partir de dessins des années 1800, de journaux de bord, de traditions orales... Plusieurs aspects de leur conception demeurent mystérieux, et l'on ignorera sans doute toujours le rôle de certains dispositifs. Le *baidarka* est manifestement fait pour parcourir de longues distances sur une mer houleuse. Minimise-t-il les turbulences dans son sillage? Et quelles



vitesses atteignent-ils? Les Aléoutes étaient-ils particulièrement résistants? Comment les *baidarkas* ont-ils évolué?

La vie au grand large

À une latitude voisine de celle de la Grande-Bretagne, les îles aléoutiennes s'égrènent le long d'un arc d'environ 2 400 kilomètres, entre la péninsule du Kamtchatka et la côte de l'Alaska. Elles marquent la limite entre l'océan Pacifique et la mer de Bering, dont les eaux sont plus froides. En raison de cette différence de température, l'archipel aléoutien est en permanence dans le brouillard et la tempête. Le climat y est relativement doux (la température moyenne est de 5 °C), mais la terre est aride, à cause du vent incessant; aucun arbre ne pousse.

Il y a 15 000 ans, vers la fin de la dernière glaciation, les îles aléoutiennes étaient plus étendues, car le niveau de la mer était plus bas qu'aujourd'hui. Le pont terrestre de la Béringie, large d'environ 1 600 kilomètres, émergeait à l'emplacement du détroit de Béring.

Lorsque le climat se réchauffa, les glaciers fondirent, et le niveau de la mer remonta de 90 mètres entre 10 000 et 6 000 ans avant notre ère.

À quelle époque les Aléoutes sont-ils arrivés dans l'archipel? Des vestiges archéologiques suggèrent qu'il y a 9 000 ans ils habitaient déjà Anangula, sur l'île d'Umnak, et l'île de Hog, dans la baie d'Unalaska (voir la figure 3). On ignore s'ils sont venus en kayak ou à pied, par le pont terrestre de la Béringie. En revanche, on sait, grâce à des fouilles effectuées à Anangula, qu'ils disposaient de nombreux instruments pour chasser les mammifères marins, dès 7 000 ans avant notre ère.

La chasse en mer nécessitait des efforts tant physiques qu'intellectuels, pour survivre dans un environnement hostile : les Aléoutes inventèrent très tôt des kayaks perfectionnés, notamment des modèles à pont couvert, dont la prise au vent était minimale. Ils construisirent aussi des maisons semi-souterraines, suivant le même principe. Les îles sont assez distantes pour que différents styles de kayaks soient apparus, mais assez

proches pour que les innovations se soient répandues dans tout l'archipel.

Les marchands russes, venus du Kamtchatka et de la mer d'Okhotsk à bord de vaisseaux lourds et mal équipés, reconnurent immédiatement la supériorité des kayaks aléoutiens. Ils réquisitionnèrent les *baidarkas* existants et s'arrogeèrent le monopole de leur construction, standardisèrent les plans et ajoutèrent certains dispositifs, tel un trou d'homme supplémentaire, pour transporter un passager. Ils obtinrent ainsi un quasi-monopole sur la chasse aux loups de mer, dont ils vendaient les fourrures aux commerçants chinois. En 1796, la Compagnie russo-américaine prit en charge l'administration des colonies d'Alaska. Sa flotte, qui comptait 700 *baidarkas*, chassait au large

1. DES CHASSEURS ALÉOUTES naviguent dans des *baidarkas* au large de la côte d'Unalaska. Cette lithographie, réalisée en 1827 par Friedrich von Kittlitz, qui voyageait à bord du sloop russe *Seniavin*, représente deux chasseurs ; l'un d'eux stabilise son kayak en maintenant sa pagaie dans l'eau, afin de projeter sa lance à l'aide d'un propulseur.



des îles aléoutiennes, de l'île Kodiak et des côtes du Sud-Est de l'Alaska. Elle cernait et tuait des populations entières de loutres de mer.

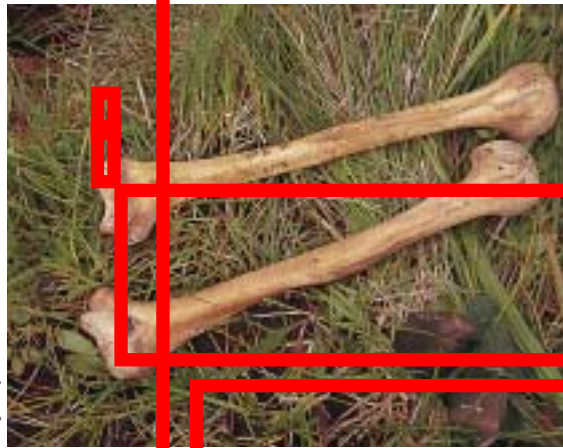
Au début des années 1800, on prenait environ 10 000 loutres par an : à ce rythme, l'extinction de l'espèce semblait proche. On prit alors des mesures pour la protéger, mais celles-ci furent assouplies en 1867, lorsque les États-Unis achetèrent l'Alaska à la Russie. Finalement, la chasse à la loutre de mer fut interdite en 1911. Simultanément, le *baidarka*, qui servait essentiellement à chasser la loutre, déclina. Ensuite, les Aléoutes continuèrent de construire et d'utiliser ces embarcations jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, mais

ils furent alors dispersés : soit les Japonais les firent prisonnier, soit les Américains les déplacèrent dans des camps provisoires au Sud-Est de l'Alaska. Lorsque les Aléoutes regagnèrent leurs foyers, très peu de *baidarkas* subsistaient et la plupart des compétences techniques pour en construire de nouveaux s'étaient perdues.

Vitesse et endurance

Le principal avantage du *baidarka* était sa vitesse. Selon les observations de navigateurs européens, les *baidarkas* naviguaient contre les courants marins les plus rapides de la région, qui atteignaient environ 6,5 nœuds, soit 12 kilomètres par heure. « Nous naviguions à plus de six nœuds. Pourtant les indigènes, dans leurs pirogues en peau de bœuf, nous suivaient très facilement », écrivait James Trevenen, aspirant de marine du capitaine James Cook, dont l'expédition traversa la passe d'Unalga en 1778. En 1820, un autre observateur rapporta qu'un navire marchant à 7,5 nœuds (14 kilomètres par heure environ) se faisait facilement dépasser par des *baidarkas* chargés de morues à ras bord. Aujourd'hui, les champions kayakistes atteignent parfois 9 nœuds (16,5 kilomètres par heure environ), mais seulement sur de très courtes distances et dans des eaux calmes.

Pourquoi les *baidarkas* étaient-ils si rapides? Parce qu'ils étaient bien conçus? Parce que les navigateurs aléoutes connaissaient bien les courants marins? Parce qu'ils étaient phy-



2. L'HUMÉRUS D'UN CHASSEUR ALÉOUTE (en bas) est plus gros que celui d'un Russe qui ne pratiquait pas le kayak (en haut). La rugosité de l'os aléoutien indique que les insertions musculaires étaient plus profondes. Grâce à leurs muscles très développés, les Aléoutes atteignaient en kayak des vitesses supérieures à huit nœuds (environ 15 kilomètres par heure) sur de longues distances.

siquement bien entraînés? On sait que ces chasseurs avaient des bras très puissants. Steve Bezekoff, un chasseur de l'île d'Umnak, cassa le dynamomètre avec lequel on voulait mesurer sa force, car la traction qu'il exerçait sur l'appareil était bien supérieure à la valeur maximale de l'échelle de mesure. Les os des chasseurs aléoutes témoignent également d'une force supérieure à la moyenne : un humérus aléoutien mis au jour en 1950 présente la plus grande rugosité jamais enregistrée chez un être humain (voir la figure 2) à cause des traces longitudinales que les insertions musculaires y avaient creusées. Les humérus des Russes contemporains des Aléoutes sont plus fins. Avec leur puissante musculature, les Aléoutes devaient avoir beaucoup d'endurance : alors que le pagayeur faisait courir son kayak, certaines parties des muscles étaient au repos pendant que d'autres étaient actives.

Pour pagayer vite et longtemps, les Aléoutes devaient aussi avoir des systèmes respiratoire et circulatoire adaptés, mais il leur arrivait quand même d'aller au-delà de leurs forces : au début des années 1800, le Russe Ivan Evseevitch Veniaminov, missionnaire envoyé en Alaska, rapporta le destin tragique d'un messager aléoutien qui parcourut 250 kilomètres en 27 heures et mourut d'une hémorragie interne peu après son arrivée.

Le *baidarka* avait une structure élastique qui encaissait sans faillir le martèlement de la mer. Sa souplesse, autant que sa vitesse, attira l'attention des

Russes : « Au départ, je n'aimais pas les pirogues en peau, à cause de leur élasticité. Mais, après m'y être habitué, je trouvais cela très agréable », écrivait le capitaine russe Urey Lisiansky, en 1805, après avoir parcouru 350 kilomètres en *baidarka*.

Dans les anciens modèles, cette souplesse venait notamment de pièces en ivoire, que les Russes nommèrent *kostochki*. L'anthropologue Joseph Lubich, le kayakiste Chris Cunningham et moi-même en avons découvert dans un *baidarka* retrouvé à Unalaska en 1826 : les radiographies de ce kayak révèlent la présence de pièces en ivoire articulées, qui équipaient de nombreux joints (voir la figure 5). Nous avons également

découvert un morceau étroit de fanon de baleine entre la quille et les flancs du bateau sur toute sa longueur, mais nous ignorons à quoi il servait.

La plupart des *baidarkas* avaient une quille composée de trois parties : elle pouvait se courber comme un ski, ainsi que le kayak, dans les limites imposées par la rigidité des plats-bords.

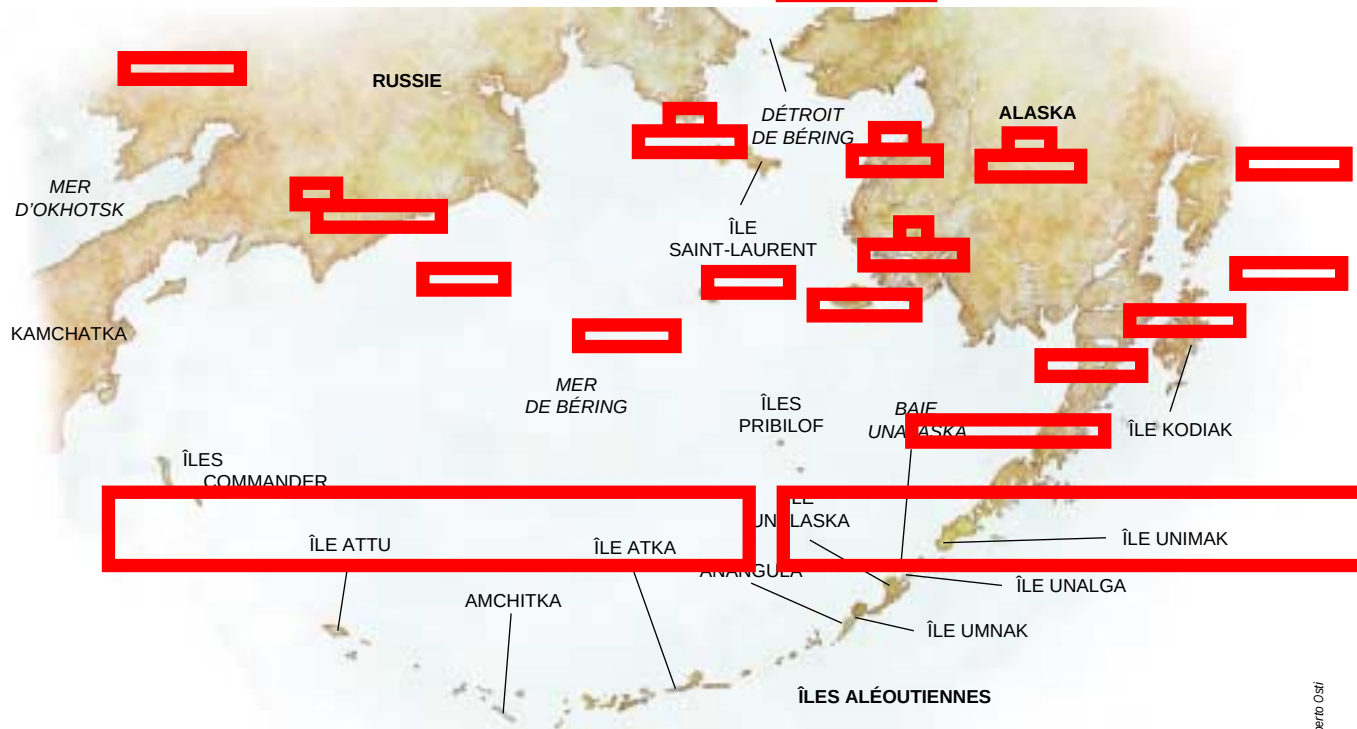
Certains supposent que la flexibilité des *baidarkas* diminuait la quantité d'énergie que les pagayeurs devaient fournir pour les faire avancer. Selon cette hypothèse encore débattue, cette énergie serait minimale si le kayak se déformait en phase avec les vagues : lorsqu'il arrive dans le creux d'une vague, ses extrémités montent tandis que sa partie centrale descend, et inversement lorsque le kayak arrive au sommet d'une vague. Deux points nommés des nœuds, restent fixes entre les extrémités et la partie centrale, pendant cette déformation « verticale binodale ». Des déformations du kayak non synchronisées avec les vagues produiraient des secousses similaires à celles qu'on ressent en roulant en voiture sur des nids-de-poule. La période de la déformation du kayak dépend de la répartition des masses et son sein et détermine son interaction avec les vagues. Comme les Aléoutes ne pouvaient pas modifier la période des vagues, ils accordaient peut-être la période de déformation des

baidarkas à l'aide de pierres : en 1741, des membres de l'expédition menée par Vitus Behring ont rapporté que les Aléoutes transportaient des pierres de lest à l'avant et à l'arrière de leurs kayaks. En changeant la répartition des

pierres, les pagayeurs auraient modifié l'amplitude de la déformation du kayak sur la vague et auraient synchronisé cette déformation avec les vagues. On ne peut pas supposer que les Aléoutes construisaient des *baidarkas*

flexibles pour éviter qu'ils ne se cassent. L'élasticité structurale devait dissiper les contraintes mécaniques locales sur la totalité des kayaks, que la légèreté de leurs matériaux de construction rendait fragiles.

Les peaux de mammifères marins qui recouvraient les *baidarkas* augmentaient-elles leur vitesse de pointe? Contrairement aux autres matériaux qui recouvrent les bateaux, ces peaux ont une élasticité non linéaire : elles



3. L'ARCHIPEL ALÉOUTIEN s'étend de l'Alaska à la Russie. Les premiers habitants de ces îles volcaniques sont peut-être arrivés dans des kayaks ou à pied, par le pont de terre de la Béringie

alors émergée (à l'emplacement du détroit de Béring), il y a 15 000 ans. Pendant la dernière glaciation, cette bande de terre était large d'environ 1 600 kilomètres.



4. LES ÎLES ALÉOUTIENNES, balayées par le vent, sont arides et inhospitalières. Pourtant les Aléoutes s'y adaptèrent en construisant des maisons à moitié souterraines, comme on le voit sur cette

aquarelle d'Unalaska, peinte par John Webber en 1778. Les *baidarkas*, au plat-bord très bas, offraient également peu de prise au vent du large.

auraient réduit les frottements en amortissant les tourbillons de l'eau en contact avec la coque.

Une proue fendue

Souples et rapides, les *baidarkas* se distinguaient aussi par leur proue fendue. Sur les illustrations datant des premiers contacts avec les Aléoutes (antérieures à 1800), on voit d'anciens *baidarkas* où la proue avait une forme de gueule ouverte (voir la figure 5). Un croquis datant des années 1790, réalisé par James Shields, un constructeur de bateaux travaillant pour les Russes, montre la partie inférieure de la proue sous l'eau et la partie supérieure affleurant la surface. Les modèles plus récents des *baidarkas* avaient aussi une proue fendue, mais sa partie inférieure était retroussée. Ces proues bifides

symbolisaient-elles des loutres de mer ou stabilisaient-elles les embarcations à l'approche des proies?

Sur les *baidarkas* à proue en forme de gueule ouverte, la partie inférieure fendait l'eau, telle une lame, minimisant les perturbations hydrodynamiques lors du déplacement du bateau à travers les vagues. La partie supérieure agissait comme une spatule de ski, empêchant que l'avant du kayak ne s'enfonce.

Les proues dont la partie inférieure était retroussée induisaient-elles aussi des effets d'«annulation de phase», utilisés aujourd'hui dans les bulbes d'étrave des pétroliers? Quand un objet en mouvement pousse une surface vers le bas, il produit une onde qui commence par une crête, mais s'il exerce une pression vers le haut, il produit une onde qui commence par un creux.

Grâce au bulbe, les deux systèmes d'ondes s'annulent mutuellement, et les pétroliers font des économies notables de carburant, aux vitesses auxquelles ils avancent. Cependant, même aux vitesses de pointe des kayaks, les gains d'énergie par effet d'annulation semblent négligeables.

En revanche, la proue fendue allongeait les *baidarkas* : comme la vitesse limite est proportionnelle à la racine carrée de la longueur de flottaison, la proue fendue permettait une nage plus rapide. Elle donnait à la coque une forme effilée et diminuait ainsi les frottements, proportionnels au rapport de la plus grande largeur à la longueur émergée du bateau à la puissance quatre. Une coque très effilée tangue facilement, mais la partie supérieure de la proue compensait peut-être cet inconvénient.

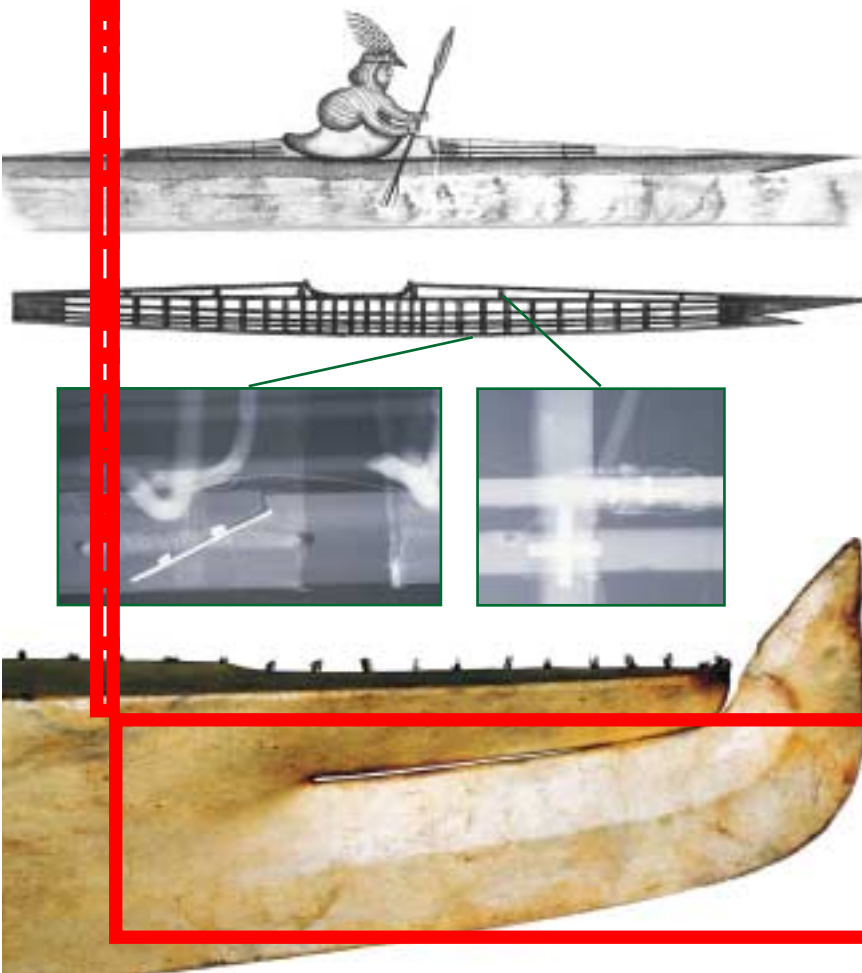
Ce modèle de kayak à proue en forme de gueule ouverte, malgré ses avantages, disparut rapidement après l'arrivée des Russes. Ces embarcations rapides menaçaient-elles les colons, victimes, au début de leur installation, de plusieurs massacres de la part d'Aléoutes mieux équipés? Les sorties en mer pour chasser la loutre s'allongeant, les kayaks à proue fendue rencontraient-ils plus de varech, ou ils s'empêtraient? La construction et le rassemblement d'immenses flottilles de chasse évitèrent-ils les poursuites individuelles de loutres? Les kayaks étroits, à proue fendue, conçus pour la vitesse et l'approche silencieuse, mais non pour le transport, seraient alors devenus inutiles.

Une poupe tronquée

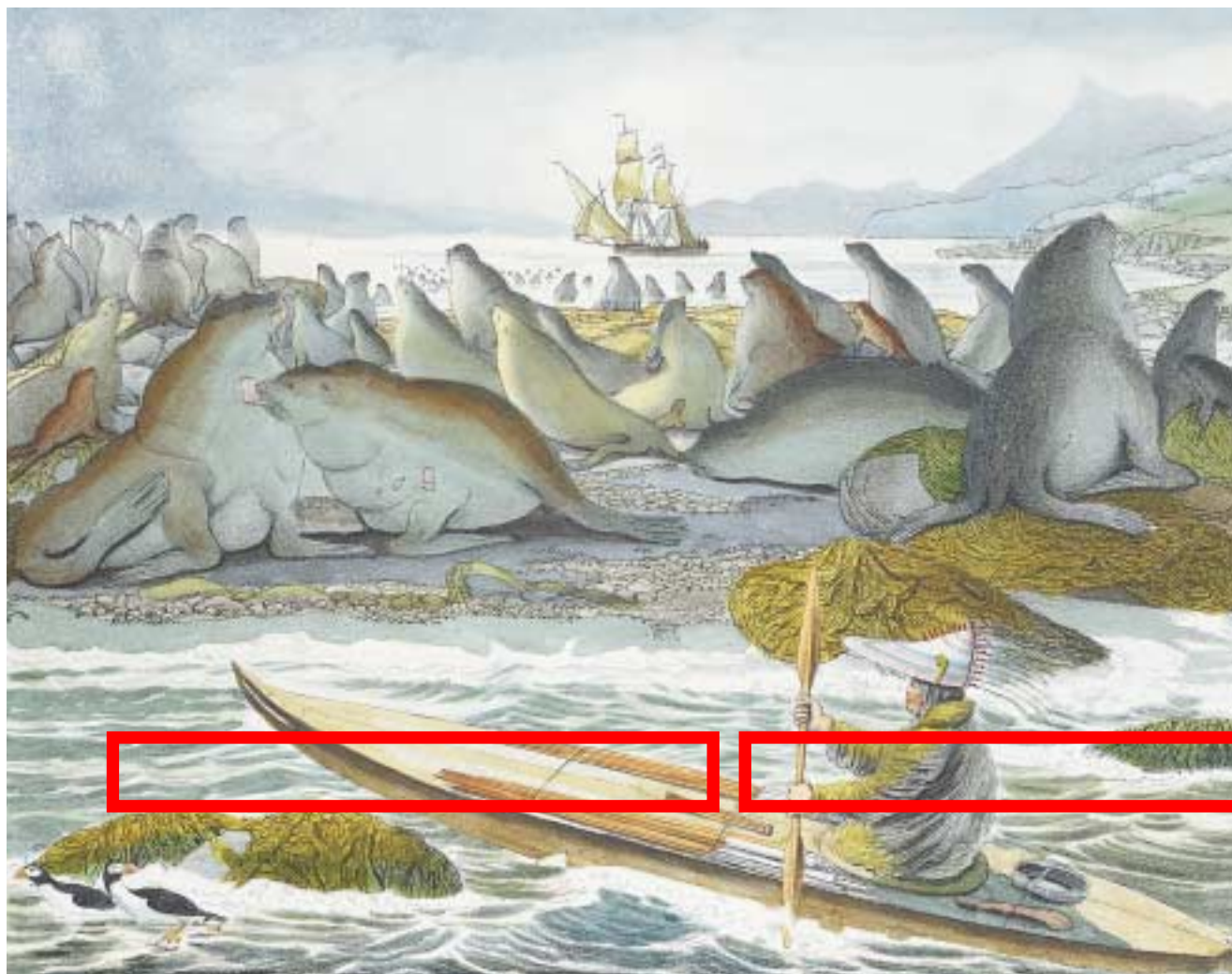
Les *baidarkas* avaient une poupe large et tronquée, qui offrait de nombreux avantages. Quand un kayak se déplace sur la mer, la surface de l'eau, fendue par la proue et déplacée par la coque, se referme derrière la poupe. L'énergie dépensée par le pagayeur se dissipe dans son sillage.

À la «vitesse critique», le kayak crée une vague dont la longueur est égale à la sienne. Aux vitesses inférieures, plusieurs vagues créées par le kayak longent sa coque. Il reste horizontal et forme un sillage régulier : la résistance à l'avancement est minimale si la poupe est effilée. Aux vitesses supérieures, en revanche, le creux de la vague créé par le kayak se trouve à l'arrière de la coque et «aspire» la poupe

Haut : avec l'autorisation de Special Collections, University of Washington. Milieu : avec l'autorisation de Baidarka Historical Society, Bellingham, Wash. Bas : G. Dyson



5. CE BAIDARKA dessiné par le navigateur anglais James Shields (en haut), présente une proue bifide typique, qui fendait l'eau, la partie supérieure restant au-dessus des vagues, tandis que la partie inférieure était immergée. Cette forme devait accroître la vitesse de pointe du *baidarka*, la partie inférieure réduisant la résistance aux vagues et la partie supérieure empêchant la proue de s'enfoncer, comme une spatule de ski. Des pièces en ivoire (voir les radiographies en cartouche) contribuaient apparemment à la flexibilité du *baidarka*. Un autre modèle à la proue fendue, dont la partie inférieure était retroussée, succéda au précédent (en bas). L'exemplaire photographié ici, de 5,4 mètres de long, est exposé au Musée national de Finlande, à Helsinki.



Avec l'autorisation de Beinecke Library, Yale University

6. CES MAMMIFÈRES MARINS des îles Pribilof n'entendaient pas les chasseurs approcher dans leurs embarcations silencieuses. Cette lithographie du début des années 1800 montre aussi un vaisseau

russe, le *Rurik*, à l'arrière-plan : l'arrivée des Russes transforma le mode de vie des Aléoutes et conduisit finalement à l'abandon de certains modèles de *baidarka*.



Alm E. Yow

7. AVEC CE *BAIDARKA*, que nous avons reconstitué en 1991, Greg Barton, médaille d'or aux jeux Olympiques, atteint une vitesse de plus de huit nœuds (environ 15 kilomètres par heure), qu'il arrive

à maintenir sur 800 mètres. Ce kayak est une version moderne de celui que James Shields avait dessiné dans les années 1790 (voir la figure 5).

De la peau de phoque au plastique

Le *baidarka* n'est que l'un des nombreux kayaks utilisés par les Esquimaux, tels les Inuits, et les autres peuples des régions arctiques, de la Sibérie au Groenland. Les Koriaks, peuple paléosibérien du Kamtchatka, construisaient des bateaux courts et larges adaptés aux eaux abritées. Les kayaks du delta du Mackenzie, dans le Nord-Ouest canadien, avaient une proue retroussée et une poupe en forme de corne. Ils servaient pour la chasse et, parfois, pour la pose des filets de pêche. Dans les régions du centre du Canada, où les routes de migration des caribous croisaient les rivières et les lacs, les Inuits construisaient des bateaux légers et lisses pour chasser ces animaux dans l'eau. Dans la baie d'Hudson et autour de l'île de Baffin, dans le Nord-Est canadien, des kayaks plus larges et plus lourds, avec de hautes proues et des rebords qui protégeaient le trou d'homme et

conféraient une grande stabilité, étaient adaptés au transport de lourdes charges.

En Europe, on pratique généralement le kayak avec les descendants des kayaks du Groenland. Ces bateaux, conçus pour la chasse, étaient étroits et maniables, avec une proue et une poupe pointues. Leur forme élégante a influencé la conception des kayaks modernes, qui sont toutefois très éloignés des kayaks anciens, tant par leur fonction que par les matériaux employés et par la façon dont ils sont fabriqués.

Les kayaks furent utilisés comme « instruments de travail » pendant des siècles, voire des millénaires. Le kayak de loisir, lui, est récent : en 1866, John MacGregor, philanthrope et voyageur britannique, publia le premier d'une série de récits consacrés au tourisme en kayak, bien que son embarcation ressemblât plutôt à un petit bateau à rames ponté. En Occident, la pratique du kayak se développa à partir de 1907, quand le tailleur allemand Hans Klenner fabriqua en série un kayak pliant suffisamment petit pour tenir dans les trains : la nouvelle classe moyenne urbaine pouvait facilement se rendre sur les lieux de navigation.

Après la grande dépression des années 1930 et la Seconde Guerre mondiale, la pratique du kayak s'essouffla : de fabrication artisanale, les kayaks étaient coûteux ; en outre, les activités de plein air étaient moins en vogue. Pourtant, les kayakistes continuaient d'expérimenter des modèles et des matériaux nouveaux. L'emploi de la fibre de verre se généralisa. La pratique du kayak de rivière s'imposa. Le kayak de mer, inspiré d'anciens kayaks du Groenland, fit son apparition.

Au milieu des années 1980, la pratique du kayak de loisir connut un essor sans précédent, grâce à une technique de fabrication révolutionnaire : le moulage rotatif, où l'on injecte du plastique dans un moule en rotation. Les kayaks devinrent ainsi plus résistants et moins coûteux : un kayak de mer fabriqué selon cette technique coûte 4 000 à 10 000 francs, alors qu'un modèle en fibre de verre ou en peau tendue sur un cadre coûte 12 000 à 18 000 francs. Les kayaks devinrent ainsi accessibles à un large public, alors même que les sports de plein air étaient de plus en plus pratiqués.

Les kayaks modernes, en plastique, aux couleurs éclatantes, ont une lointaine parenté avec des modèles d'anciens kayaks du Groenland en bois, en ivoire et en peau de phoque. Ils ne servent plus à survivre dans un environnement hostile, mais à se divertir dans notre société d'abandon.



Dessin : Roberto Osti, d'après E.Y. Arima (gauche et milieu) et E.T. Adney et H.L. Chapelle (droite). Photographie : Heritage Kayaks

LES KAYAKS DES ESQUIMAUX diffèrent beaucoup des kayaks modernes fabriqués en série. De gauche à droite (en haut de la page), on a représenté un kayak du centre du Canada pour chasser le caribou, avec des motifs peints, un kayak du delta de Mackenzie, au Nord-Ouest du Canada, pour tendre des filets de pêche, datant de 1914, et un kayak du Sud-Ouest du Groenland, datant de 1883. La photographie ci-dessus montre un kayak moderne en polyéthylène moulé, avec un trou d'homme ouvert.

vers le bas. Pour éviter qu'elle ne s'enfonçe, la poupe doit avoir une forme tronquée. La partie arrière du bateau doit se terminer « quelque peu abruptement », selon l'expression du capitaine Coolidge qui décrivait ainsi la poupe du *baidarka*. Aujourd'hui, les bateaux à voiles et à moteur conçus pour la vitesse ont parfois des poupes de ce genre, mais rarement les kayaks.

Bien que certains principes de la conception du *baidarka* nous échappent, ce bateau, qui fut perfectionné pendant plus d'un millénaire, reste un fleuron de sa catégorie. De la proue à la poupe et de la charpente au revêtement en peau, le *baidarka* a évolué en accord avec les lois de l'hydrodynamique. Le mystère du kayak aléou-

tien ne réside pas seulement dans les principes qui sous-tendent sa conception, mais aussi dans sa capacité à apporter une solution synthétique à des problèmes divers. La remarque de

George D. SON construit des kayaks depuis 1964 et enseigne l'histoire de la technologie à l'Université de l'État de Washington.

Joëlle ROBERT-LAMBIN, *Le kayak aléoute – vu par son constructeur et son utilisateur – et la chasse à la loutre de mer*, Objets et Mondes, La revue du Musée de l'homme, t. 20, fasc. 1, 1980.

William S. LAUGHLIN, *Aleuts : Survivors of the Bering Land Bridge*, Holt, Rinehart and Winston, 1980.

Veniaminov, faite en 1840, reste d'actualité : « Le *baidarka* des Aléoutes semble si parfait dans son genre que les modifications amélioreraient peu ses qualités nautiques. »

George D. SON, *Baidarka : The Kayak*, Alaska Northwest Books / Graphic Arts Center, 1986.

Contributions to Kayak Studies, sous la direction de E.Y. Arima, Canadian Ethnology Service Mercury Series, paper n° 122, Canadian Museum of Civilization, 1991.

Baidarka, in *Scientific American Frontiers*, program n° 203, segment n° 1, 1991.

Wolfgang BRINCK, *The Aleutian Kayak*, Ragged Mountain Press, 1995.



Une souris intelligente

JOE TS'EN

En fabriquant des souris plus « intelligentes », les généticiens découvrent quelques-uns des mécanismes moléculaires de l'apprentissage et de la mémoire.

La souris au masque de fer, La vieille souris et la mer, La troisième souris, Des souris et des souris... L'annonce de souris rendues plus intelligentes par des manipulations génétiques a rapidement suscité des idées de pastiches, où la souris remplace l'animal intelligent par excellence qu'est l'être humain. Modifier les gènes de petits mammifères pour augmenter leurs capacités est une idée qui amuse. Pourtant, nous n'avons pas pensé à Mickey lors de nos travaux ; nous voulions comprendre les mécanismes cérébraux qui assurent l'apprentissage et certains types de mémoires.

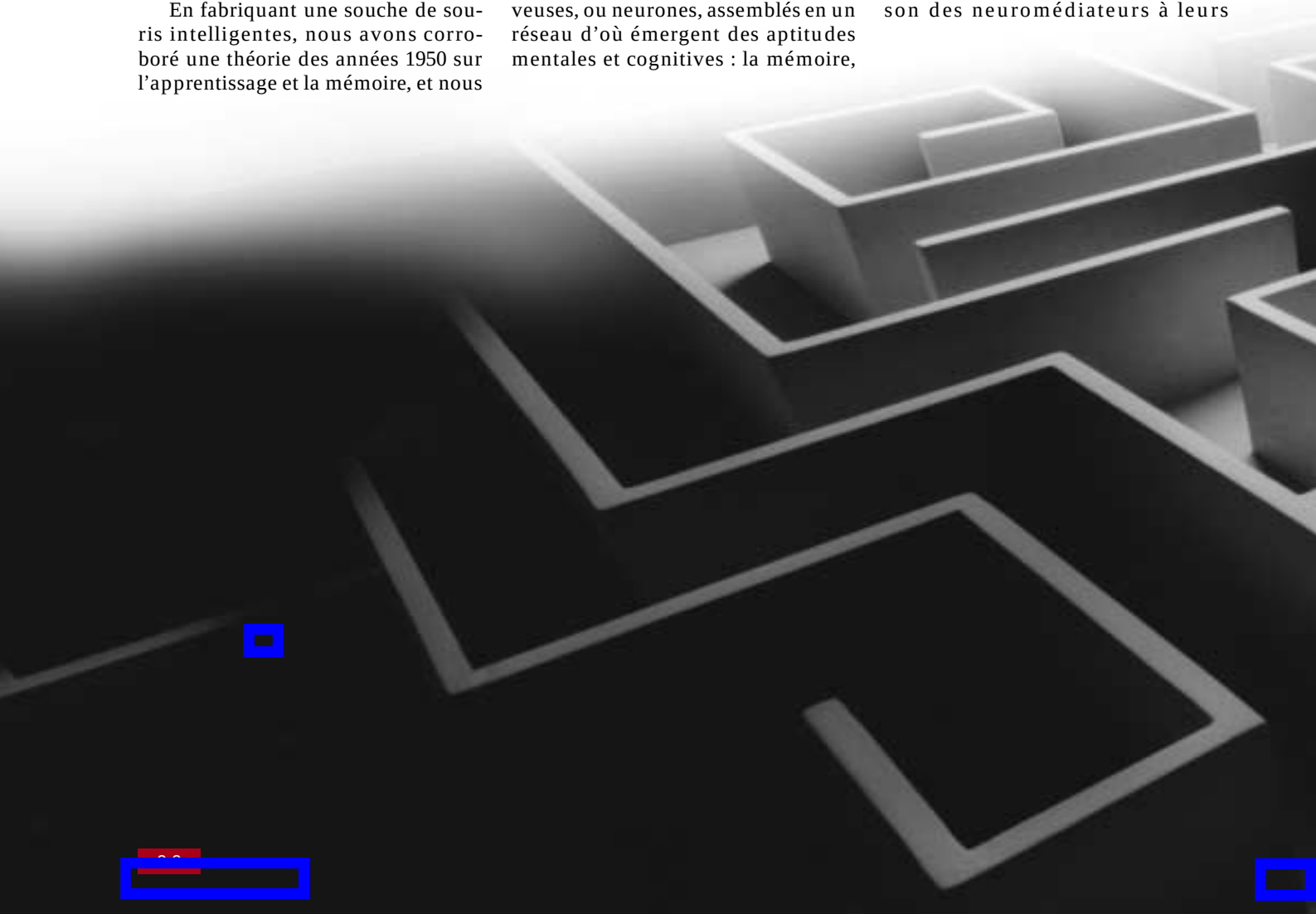
En fabriquant une souche de souris intelligentes, nous avons corroboré une théorie des années 1950 sur l'apprentissage et la mémoire, et nous

avons démontré le rôle central d'une molécule particulière dans la mémorisation. Avec cette découverte, nous espérons avoir préparé le terrain pour la mise au point de médicaments contre des troubles du système nerveux, telle la maladie d'Alzheimer, ou de produits qui atténueront les capacités d'apprentissage et de mémorisation ou, au moins, qui atténueront les déficits, tels ceux liés au vieillissement.

L'alphabet de la mémoire

Le cerveau humain est composé d'environ 100 milliards de cellules nerveuses, ou neurones, assemblés en un réseau d'où émergent des aptitudes mentales et cognitives : la mémoire,

l'intelligence, l'émotion, la personnalité... Les premières théories des mécanismes moléculaires de l'apprentissage et de la mémoire ont été proposées en 1949 par le psychologue canadien Donald Hebb : un souvenir serait créé lorsque l'action simultanée de deux neurones renforce la synapse, c'est-à-dire le point par lequel ils communiquent. Dans une synapse, l'information électrique d'un neurone présynaptique libère des molécules, nommées neuromédiateurs, qui diffusent dans la « fente synaptique » jusqu'à des récepteurs du neurone postsynaptique ; la liaison des neuromédiateurs à leurs



récepteurs déclenche la formation d'un nouveau signal électrique dans le neurone postsynaptique (voir la figure 4).

En 1973, à Oslo, Timothy Bliss et Terje Lømo ont découvert un système biologique conforme à la théorie de Hebb : les synapses d'une région cérébrale nommée hippocampe, connue pour être essentielle à la mémoire des êtres humains et des animaux, se renforcent après une stimulation électrique à haute fréquence. Cette augmentation de l'efficacité synaptique, nommée potentialisation à long terme, dure parfois plusieurs semaines. Puis d'autres équipes ont montré que des stimulations à basse fréquence des mêmes circuits de l'hippocampe diminuent durablement la force des connexions : cette réduction est une dépression à long terme.

L'augmentation ou la diminution de l'efficacité synaptique par la potentialisation et la dépression à long terme sont aujourd'hui les mécanismes les plus probables de stockage d'information dans le cerveau et d'effacement d'information. On sait que

des potentialisations ont également lieu dans l'autres régions cérébrales tels le néo-cortex, c'est-à-dire la matière grise à la périphérie des hémisphères cérébraux, et l'amygdale, une structure située devant l'hippocampe et qui intervient dans la commande des sensations.

Quelles sont les bases moléculaires de la plasticité synaptique ? Dans les années 1980 et 1990, des neurobiologistes ont montré que les potentialisations et les dépressions à long terme ne dépendent que de l'activation des récepteurs au NMDA (du nom de l'acide N-méthyl-D-aspartique, un composé de synthèse qui se lie à ces récepteurs), localisés sur la membrane des neurones postsynaptiques (voir *Les mécanismes de la mémoire*, par Serge Laroche, *Pour la Science*, décembre 1998).

Ces récepteurs sont des pores, formés de quatre sous-unités protéiques, qui commandent l'entrée d'ions calcium dans les neurones. Ils fonctionnent conformément à la théorie de Hebb : ils s'ouvrent quand ils se lient à un neuromédiateur (le gluta-

mate), tandis que leur activation ne modifie pas la conductance électrique de la membrane. Ainsi, à la manière d'un commutateur moléculaire, ils détectent des coïncidences, c'est-à-dire des associations de deux événements.

Malgré la découverte du rôle des récepteurs au NMDA dans la potentialisation ou la dépression, la compréhension moléculaire de l'apprentissage ou de la mémoire est longtemps restée inaccessible. Au cours des années 1980, Richard Morris et ses collègues de l'Université d'Édimbourg ont remarqué que les rats à qui l'on injectait dans le cerveau des inhibiteurs des récepteurs au NMDA réussissent moins bien que d'autres à un test nommé labyrinthe aquatique de Morris (voir la figure 2) : ce résultat est conforme à l'hypothèse selon laquelle l'apprentissage et la mémoire dépendent de la potentialisation à long terme.



Les souris KO

Puis, en 1996, j'ai utilisé la technique des souris knock-out pour étudier le rôle des récepteurs au NMDA dans l'apprentissage et la mémoire. Chez les souris knock-out, un gène a été inactivé ou supprimé de toutes leurs cellules : on a éteint la fonction du gène de l'observation physiologique et comportementale de ces animaux.

Toutefois, la plupart des souris knock-out meurent à la naissance ou peu après, car les gènes manquants sont indispensables au développement normal : c'est le cas des gènes qui codent les différentes sous-unités des récepteurs au NMDA. J'ai alors mis au point une méthode de suppression de la sous-unité NR1 du récepteur au NMDA dans une partie de l'hippocampe nommée CA1 (voir la figure 3).

Par chance, c'est dans cette région CA1 que la potentialisation et la dépression à long terme avaient été le plus étudiées. En outre, on savait qu'une lésion cérébrale de cette aire entraîne des déficits mnésiques : les variations de l'efficacité synaptique dans les régions CA1

de ces souris disparaissent. Ces dernières ont des représentations spatiales normales et une mémoire spatiale déficiente : elles ne retrouvent pas leur chemin dans un labyrinthe aquatique. De plus, elles ont également des déficits dans plusieurs autres tâches de mémoire.

Toutefois, ces observations n'étaient pas une confirmation suffisante de l'hypothèse selon laquelle les récepteurs au NMDA sont essentiels pour la mémoire. En effet, les drogues qui bloquent les récepteurs perturbent souvent les activités sensorielles, motrices et comportementales. Elles pouvaient agir sur des molécules différentes des récepteurs au NMDA de sorte que les déficits mnésiques des souris knock-out auraient été dus à d'autres anomalies, insoupçonnées et indépendantes des dépressions ou des potentialisations.

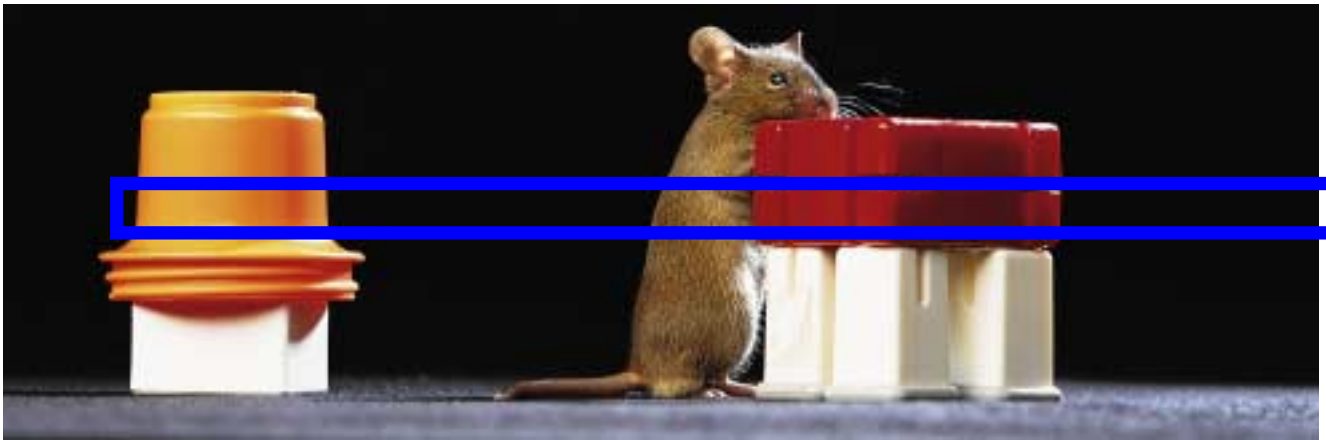
Obtiendrait-on des indications plus probantes en augmentant la fonction des récepteurs au NMDA chez la souris ? L'augmentation des capacités d'apprentissage et de mémoire de tels ani-

maux montrerait alors que les récepteurs au NMDA sont des éléments centraux des processus mnésiques.

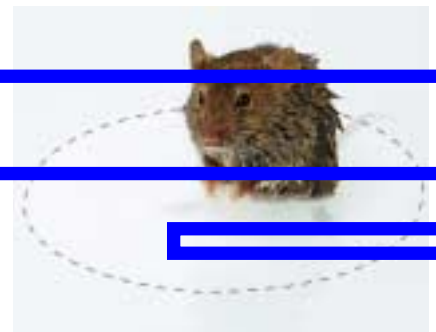
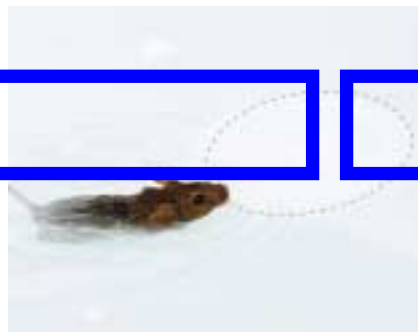
Cette fois, je me suis intéressé à l'autre sous-unité des récepteurs au NMDA : les parties NR2A et NR2B. En effet, on savait que, chez des animaux tels que les oiseaux, les rongeurs et les primates, les récepteurs au NMDA restent actifs, c'est-à-dire ouverts, plus longtemps chez les jeunes que chez les adultes.

Cette différence semblait expliquer les meilleures capacités d'apprentissage et de mémoire des animaux jeunes.

Or, lorsque les individus vieillissent, des récepteurs au NMDA dotés de la sous-unité NR2A remplacent ceux qui contiennent la sous-unité NR2B. Des expériences *in vitro* ont montré que les récepteurs à sous-unité NR2B res-



1. LORS D'UN TEST DE RECONNAISSANCE, les souris Doogie se souviennent plus longtemps d'un objet déjà vu (en jaune) : elles n'examinent que le nouvel objet présenté (en rouge).



2. DANS LE TEST DU LABYRINTHE AQUATIQUE DE MORRIS, on met une souris dans une piscine d'eau trouble, où elle nage à la recherche d'une plate-forme peu immergée sur laquelle elle peut se reposer au sec. Elle ne dispose pour la repérer que d'un point rouge placé sur

un rideau noir qui cerne le bassin. Les souris Doogie atteignent plus rapidement la plate-forme que les souris normales. De plus, lorsque la plate-forme est ôtée, les souris Doogie se souviennent de l'endroit où elle était et y passent plus de temps.

tent ouverts plus longtemps que ceux à sous-unité NR2A.

Nous avons alors injecté, dans des ovules fécondés de souris, le gène qui code la sous-unité NR2B liée à un segment d'ADN qui favorise l'expression du gène dans le cerveau adulte ; ce complexe s'intègre aux chromosomes, qui reçoivent ainsi un exemplaire supplémentaire du gène NR2B. Chez les souris modifiées qui naquirent de ces ovules, les récepteurs au NMDA restent ouverts pendant environ 230 millisecondes, soit près de deux fois plus longtemps que chez des souris normales. De surcroît, les neurones de l'hippocampe des souris adultes renforcent leurs connexions synaptiques plus efficacement que ceux de souris normales du même âge : leurs connexions ressemblent à celles des souris juvéniles.

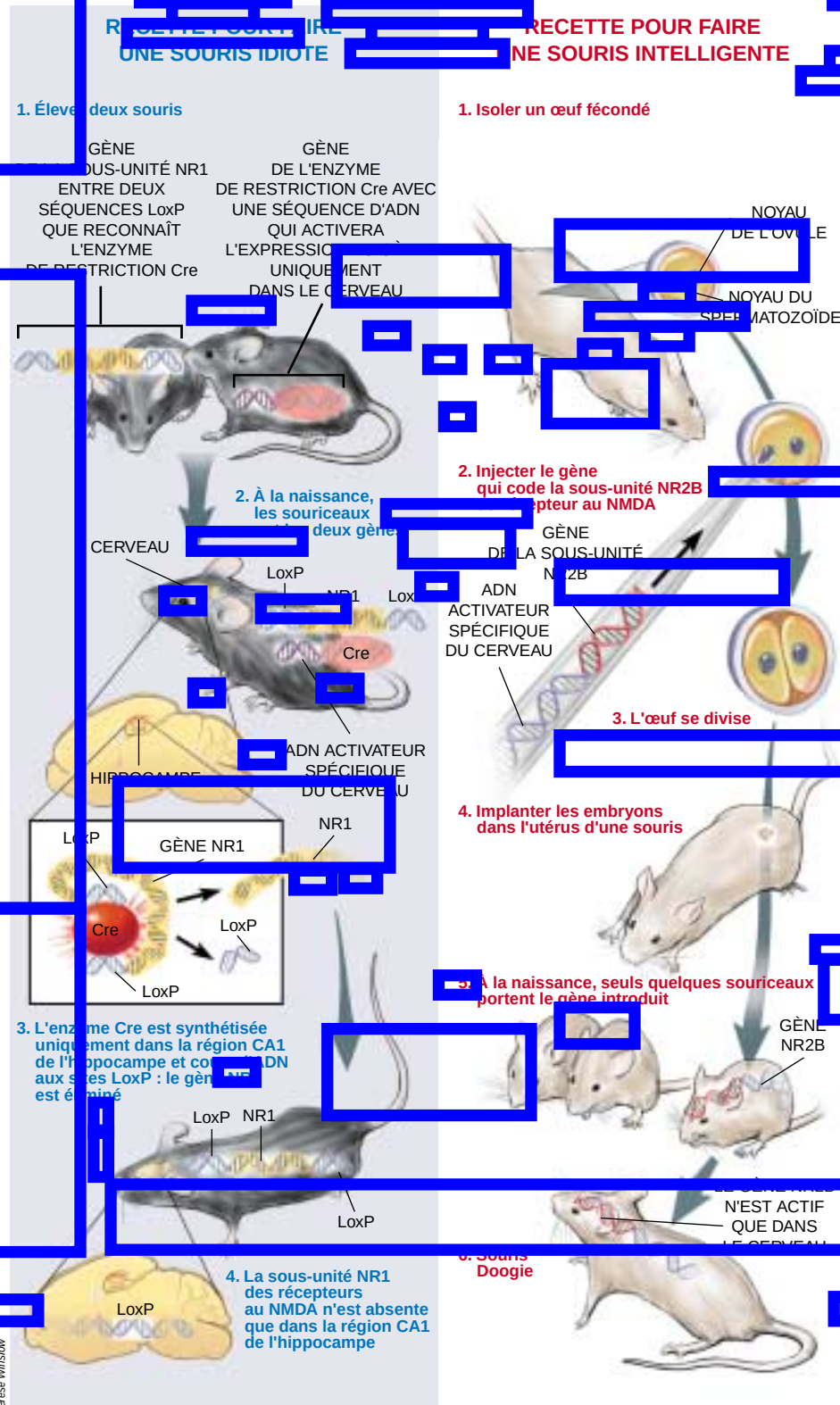
À chaque âge, sa sous-unité

Quelles sont les capacités d'apprentissage et de mémoire de ces souris baptisées Doogie (d'après un personnage de feuilleton télévisé)? Nous avons d'abord testé la reconnaissance des objets (l'un des aspects les plus primaires de la mémoire) : placées dans une boîte ouverte, des souris Doogie ont examiné deux objets pendant cinq minutes. Après plusieurs jours, nous avons remplacé l'un de ces objets et remis les souris dans la boîte. Les souris modifiées se souvenaient de l'objet ancien et n'avaient d'attention que pour le nouveau. En revanche, des souris normales consacraient autant de temps à chacun des deux objets : l'objet ancien ne leur était pas plus familier que le nouveau. Les tests successifs, à différents intervalles de temps, ont montré que les souris Doogie se souvenaient des objets quatre à cinq fois plus longtemps que leurs congénères normales (voir la figure 1).

Puis, avec mon collègue Ya-Ping Tang, nous avons examiné la capacité des souris à associer un choc électrique léger à l'endroit où elles sont, ou à un certain son. Quelques jours plus tard, lorsqu'elles sont replacées au même endroit, elles se souviennent du choc et se mobilisent, c'est-à-dire qu'elles aient peur, est supérieure à celle des souris normales. Ces tests indiquent que les souris Doogie ont une meilleure mémoire.

Apprennent-elles également impossible, et sans apprentissage il n'y a pas de mémoire. Les phases différentes du même processus progressent continuellement, dont les étapes sont influencées par l'apprentissage sans mémoire, l'apprentissage est

impossible, et sans apprentissage il n'y a pas de mémoire. Les phases différentes du même processus progressent continuellement, dont les étapes sont influencées par l'apprentissage sans mémoire, l'apprentissage est



3. GRÂCE À UN GÈNE SUPPLÉMENTAIRE de la sous-unité NR2B du récepteur au NMDA, les capacités de mémoire et d'apprentissage d'une souris augmentent (à droite). Au contraire, lorsque l'on supprime le gène de la sous-unité NR1 du même récepteur, la souris n'apprend plus.

des souris Doogie sur leur apprentissage.

Les animaux préalablement conditionnés dans la chambre à sol électrique étaient ensuite replacés à plusieurs reprises dans le même espace sans choc électrique : cinq transferts successifs, en moyenne, permettent à la plupart des animaux d'oublier l'association entre la chambre et la décharge électrique. Les souris Doogie apprennent à ne plus avoir peur en deux répétitions seulement. Elles ont également appris à ne plus avoir peur du son plus vite que les souris normales.

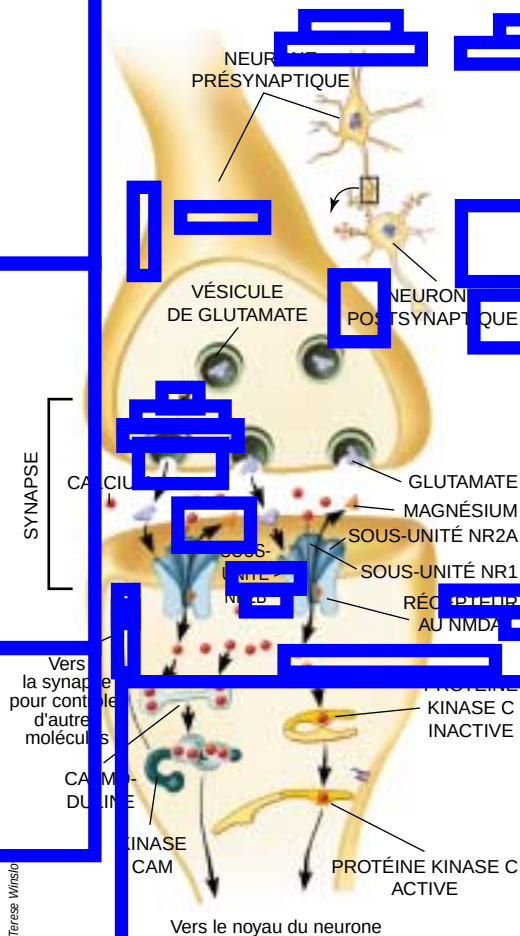
Enfin, dans le labyrinthe aquatique de Morris, les souris utilisent des indices visuels situés sur le mur du laboratoire pour localiser une plate-forme immergée dans une piscine d'eau trouble. Cette tâche, plus complexe, sollicite de nombreuses attitudes cognitives tels l'analyse, l'élaboration d'une stratégie, l'apprentissage et la mémoire. Les souris modifiées génétiquement ont, à nouveau, battu les animaux normaux.

Nos résultats confirment la théorie de Hebb et montrent également que les récepteurs au NMDA sont des interrupteurs moléculaires de nombreuses formes d'apprentissage et de mémoire ; ce ne sont probablement pas les seuls.

De l'intelligence en sachet ?

Depuis la publication de nos résultats, le public s'interroge : pourra-t-on former des enfants plus intelligents ou des pilules qui amélioreront le fonctionnement du cerveau ?

Sans doute pas. Selon de nombreux biologistes, l'intelligence est une capacité à résoudre des problèmes qui, outre l'apprentissage et la mémoire, requiert des facultés telles que le raisonnement, l'analyse et la généralisation des informations acquises. La plupart des animaux apprennent, se souviennent, généralisent et résolvent différents types de problèmes, tels se repérer, anticiper les relations entre une cause et son effet, échapper aux dangers. Les humains ont également plusieurs formes d'intelligence, par exemple celles d'un bon mathématicien, d'un chef d'entreprise efficace ou d'un footballeur exceptionnel (voir *Les formes*



4. LES SYNAPSES sont les zones par lesquelles les neurones communiquent. Selon l'hypothèse la plus répandue, la mémoire dépend des récepteurs au NMDA, qui laissent passer le calcium dans le neurone postsynaptique. Ces récepteurs ne fonctionnent que lorsqu'ils détectent deux signaux simultanés : la libération de glutamate par le neurone présynaptique et un signal électrique qui entraîne la sortie d'ions magnésium par le canal du récepteur. L'entrée des ions calcium active une cascade de réactions enzymatiques qui renforcent la synapse.

d'intelligence, par Howard Gardner, *Pour la Science*, décembre 1998).

Comme l'apprentissage et la mémoire interviennent dans la résolution de problèmes, leur augmentation accroît probablement l'intelligence, mais dans des proportions qui dépendent des tâches à accomplir. Par exemple, des animaux qui reconnaissent mieux les objets et s'orientent mieux dans des labyrinthes trouveront sans doute plus facilement la nourriture dans un

environnement naturel ou échapperont plus aisément à un prédateur, mais le génie génétique n'en fera pas des pianistes virtuoses.

L'observation d'une différence d'apprentissage et de mémorisation après une manipulation génétique qui ne surenrichit pas la sous-unité NR2B est une piste possible pour de nouveaux médicaments contre des troubles de la mémoire. Par exemple, des composés augmentant l'activité ou la quantité des sous-unités NR2B amélioreraient la mémoire des personnes âgées atteintes de la maladie d'Alzheimer ou d'autres troubles cérébraux.

Bien que l'augmentation de l'activité des sous-unités NR2B chez les souris Doogie n'ait entraîné ni toxicité, ni épilepsie, ni accident vasculaire cérébral, les pharmacologues devront évaluer les effets secondaires de ces drogues chez les êtres humains.

D'autre part, la découverte du rôle des récepteurs au NMDA pose des questions biologiques fondamentales : pourquoi la quantité de sous-unités NR2B diminue-t-elle avec l'âge ? Selon certains biologistes, le remplacement de la sous-unité NR2B par la sous-unité NR2A empêche la surcharge mnésique. Pour d'autres, la diminution des capacités mnésiques résulte d'une évolution adaptative : elle réduirait la probabilité que les individus âgés – qui, probablement, se sont déjà reproduits – rivalisent avec les jeunes dans la compétition pour des ressources telles que la nourriture ou pour des partenaires sexuels.

Ceux dont un proche souffre de la maladie d'Alzheimer peuvent en témoigner : la mémoire définit un individu bien plus que les caractéristiques faciales ou physiques. Ainsi, comprendre les mécanismes moléculaires de l'apprentissage et de la mémoire, c'est approcher notre identité et, au-delà, notre culture et notre civilisation.

Joe TSIEH est neurobiologiste à l'Université Princeton.

Donald O. HEBB, *The Organization of Behavior : A Neuropsychological Theory*, John Wiley, 1949.

Larry R. SQUIRE, *Memory and Brain*, Oxford University Press, 1987.

Robert C. MALENKA et Roger A. NICOLL, *Long-Term Potentiation – A Decade of Progress?*, in *Science*, vol. 285, n° 5435, pp. 1870-1874, 17 septembre 1999.

Joe Z. TSIEH, *Enhancing the Link between Hebb's Coincidence Detection and Memory Formation*, in *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 10, n° 2, avril 2000.

Les essais cliniques

JUSTIN ZIVIN

Peu de principes actifs franchissent toutes les étapes qui séparent le laboratoire, où ils sont synthétisés, de la pharmacie, où ils figurent dans des médicaments commercialisés. On cherche à réduire la durée et le coût des essais cliniques, sans réduire la rigueur de l'évaluation des nouveaux produits.

L'angiostatine et l'endostatine ont été récemment qualifiées – de façon très prématurée – de remèdes miracles du cancer. Administrées à des souris, ces substances ont fait considérablement régresser la taille des tumeurs qui avaient été initialement provoquées, de sorte que toutes la presse en a parlé au printemps 1998, puis elles ont été «oubliées».

Pourtant les biologistes ont poursuivi leur étude lente et méthodique de ces substances. En septembre 1999, des médecins étaient enfin prêts à tester l'endostatine sur l'homme. La phase I des essais cliniques est en cours dans plusieurs hôpitaux ; sauf imprévu, ces essais devraient se poursuivre pendant toute l'année 2000. Toutefois, même si tout se passe bien et si l'endostatine se révèle être une molécule sûre et efficace, elle ne sera pas administrée aux malades avant plusieurs années.

Souvent, la thérapie génique fait également les grands titres des journaux. Pourtant, après 50 ans de biologie moléculaire, un seul traitement efficace de ce type contre une maladie immunitaire rare semble disponible (voir *Thérapie génique : premier succès*, page 23). Des essais de thérapie génique sont en cours – et font l'objet d'examen minutieux : dans ce cas, la question n'est pas la lenteur de la recherche, mais celle des dangers potentiels. En septembre 1999, aux États-Unis, un jeune homme est mort alors qu'il participait à la phase I d'un essai de thérapie génique contre une maladie métabolique rare, une déficience en ornithine transcarbamylase. Dans les mois qui ont suivi, d'autres décès sont survenus aux États-Unis au cours d'autres essais cliniques

de thérapie génique. Comment ces essais avaient-ils été menés ? Des erreurs avaient-elles été commises ?

Les essais cliniques se déroulent en trois phases qui doivent démontrer l'efficacité et l'innocuité des traitements potentiels. Les tests nécessaires durent parfois plus de dix ans et ils coûtent des centaines de millions de francs. Les essais qui déçoivent les espoirs sont notablement plus nombreux que ceux qui démontrent l'efficacité des traitements testés, mais ils sont tout aussi onéreux. Les laboratoires pharmaceutiques ne communiquent pas facilement des informations sur leurs échecs, de sorte qu'une évaluation précise du nombre de médicaments et de dispositifs médicaux testés est impossible (au cours des dix dernières années, les échecs se sont vraisemblablement comptés par milliers).

L'organisation des essais est souvent contestée. Ainsi, certains des essais thérapeutiques les plus récents ont servi à des individus à obtenir des médicaments qui n'en étaient qu'au stade expérimental, mais qui, selon eux, étaient le seul espoir de guérison. D'autre part, certains essais cliniques ont été contestés. Les laboratoires pharmaceutiques, qui doivent payer des essais longs et coûteux, sélectionnent-ils les résultats les plus favorables ? Pour que les personnes participant aux essais donnent leur «consentement éclairé», elles doivent avoir connaissance de tous les risques ; comment les en informer quand l'objet du test est précisément de déterminer ces risques ? Comment tester correctement un médicament potentiel et mettre rapidement à la disposition des malades des traitements efficaces ? Pressés par le public, par les gouvernements et par les industriels

qui financent la recherche médicale, les cliniciens cherchent sans cesse à réduire les coûts et la longueur des essais cliniques sans, pour autant, réduire la fiabilité de ces tests destinés à protéger les malades et à garantir l'innocuité et l'efficacité des nouveaux traitements.

Depuis plus de 20 ans, nous cherchons à améliorer les essais cliniques classiques et à trouver d'autres moyens d'évaluation. Certaines de ces techniques amélioreront les méthodes actuelles, mais je reste convaincu que les essais cliniques en trois étapes, strictement contrôlés, où ni les malades ni les médecins ne connaissent la nature des molécules testées, restent le test le plus fiable des nouveaux médicaments et des dispositifs médicaux.

La protection des personnes

Un des principaux griefs que l'on fait aux études actuelles est celui de l'expérimentation en double aveugle : ni les malades ni les médecins ne connaissent la nature des substances administrées ; ils ignorent lesquelles sont des placebos, lesquelles sont des médicaments de référence connus pour leur efficacité, ou la substance en cours d'évaluation. Les personnes traitées ignorent notamment si elles appartiennent au groupe testé ou au groupe témoin, et se plaignent souvent de n'être que des cobayes aux mains de puissants laboratoires pharmaceutiques. Elles voudraient recevoir le traitement le plus récent – parfois leur dernière chance.

Néanmoins, si les organisateurs d'un essai savaient que le composé étudié est plus efficace que les médicaments disponibles, l'essai serait

inutile. La répartition aléatoire des malades en un groupe test et en un groupe témoin est scientifiquement indispensable, sinon les résultats seraient douteux. Si le groupe testé ne contenait que des personnes chez qui les autres traitements ont échoué, les médicaments testés risqueraient de paraître moins efficaces que le placebo, uniquement parce que les malades testés sont déjà trop gravement atteints au début de l'essai. Au contraire, si les responsables de l'essai clinique administraient en le sachant ou en l'ignorant) la substance testée à des personnes peu malades, la substance semblerait exagérément efficace.

Pour éviter des abus et tenir compte de l'inquiétude de certains malades, les organisateurs d'essais cliniques s'efforcent de se souvenir toujours que, d'un point de vue éthique, les médecins sont tenus de procurer aux malades les meilleurs soins possibles, qu'ils fassent ou non partie d'un essai clinique. Les médecins peuvent éviter de demander à certains patients de participer à un essai clinique, et les malades ne sont jamais contraints d'accepter. Lorsqu'une personne décide de participer à un essai, les médecins doivent lui fournir, oralement et par écrit, des explications complètes sur la nature de l'étude, et tous les renseignements

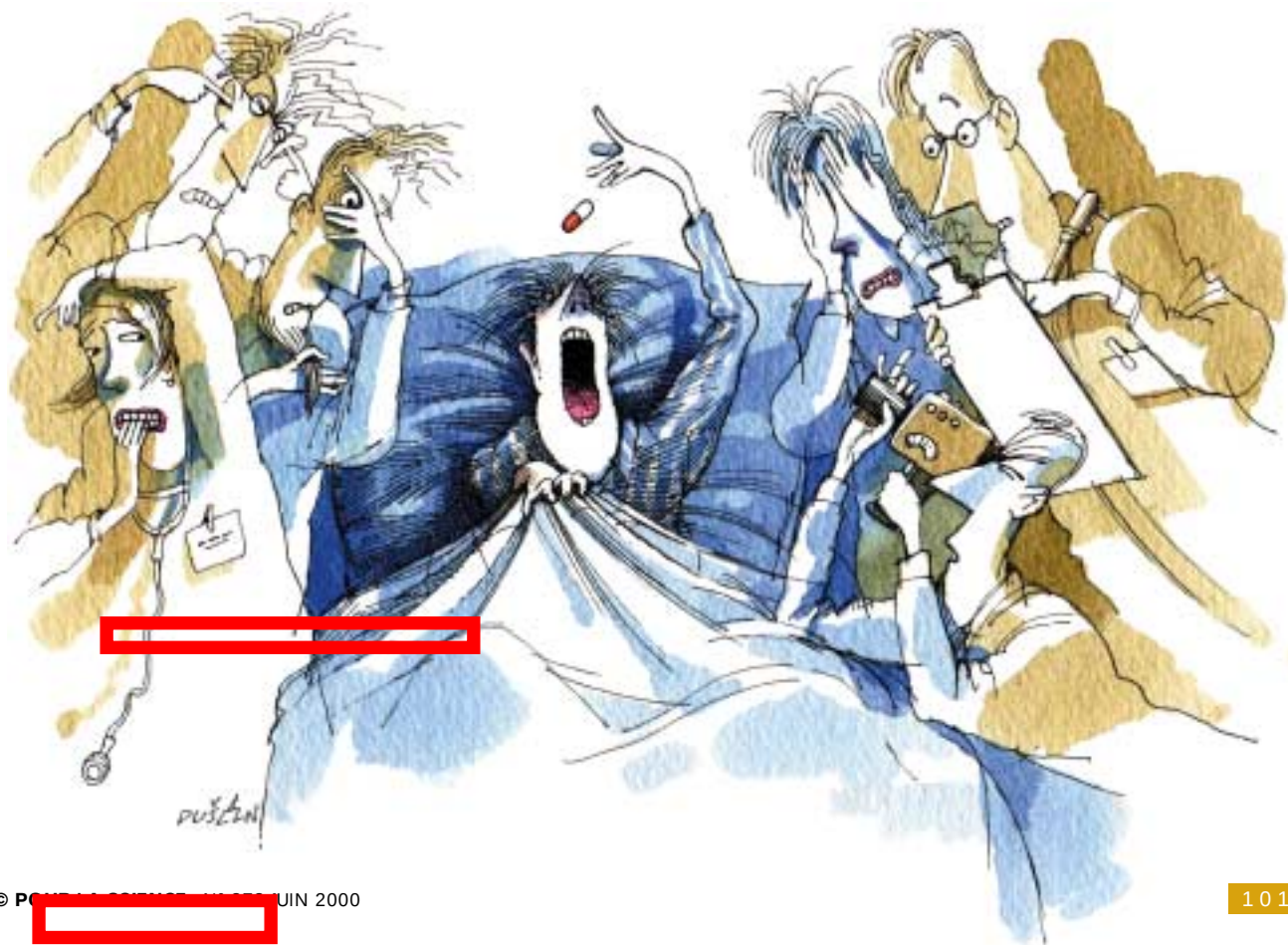
disponibles sur les risques potentiels et sur les bénéfices envisageables. Quand les malades ou les personnes responsables des malades acceptent, ils doivent signer un document écrit, un consentement éclairé. Les malades peuvent refuser de participer à un essai ou s'en retirer à tout moment.

Comme on ne connaît jamais tous les effets secondaires éventuels d'une substance en cours d'expérimentation, les hôpitaux américains disposent d'un comité auquel participent le personnel soignant, les associations de malades et divers adhérents, tels des avocats ou des membres du clergé. Ce comité doit donner son accord avant que l'essai ne commence; quand l'un des membres est inquiet sur le déroulement de l'essai, il peut faire cesser l'essai ou demander d'en modifier la procédure.

Enfin, un groupe de praticiens et de statisticiens travaille indépendamment des scientifiques et du laboratoire pharmaceutique qui effectuent l'essai. Ils recueillent les résultats, vérifient en permanence l'innocuité du produit ou du traitement testé et évaluent régulièrement le bon déroulement de l'essai. Quand l'équipe trouve que le groupe soumis au traitement va notablement mieux que le groupe témoin (ou inversement), elle peut conseiller de mettre fin à l'essai.

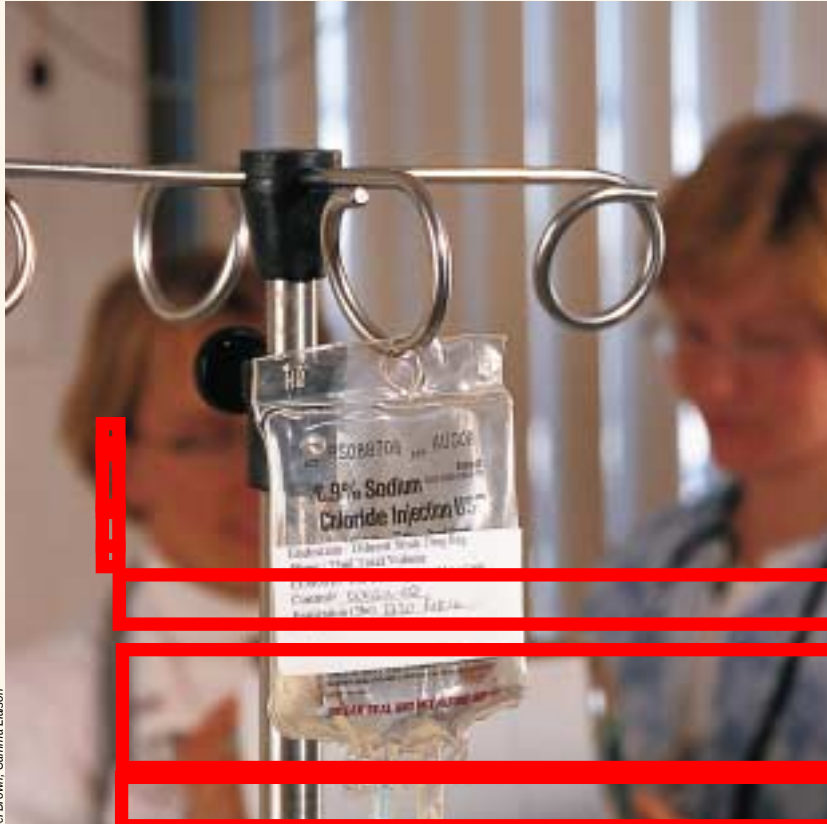
Parfois certains médecins proposent des traitements expérimentaux en dehors de tout essai clinique. Des traitements qui n'ont pas encore leur autorisation de mise sur le marché sont donnés à titre compassionnel. Comme ils n'ont pas été testés de façon rigoureuse sur l'homme, les malades n'ont l'assurance ni de leur efficacité, ni même de leur innocuité.

Les essais de thérapie génique qui ont entraîné la mort semblent avoir été mal conduits: certains risques associés au traitement avaient été constatés, soit lors de tests sur l'animal, soit chez d'autres personnes traitées, mais ils n'auraient pas été communiqués aux comités de coordination de ces essais. Certaines complications avaient été signalées à l'administration sanitaire américaine, mais cette dernière ne transmet pas d'informations sur les essais cliniques. Si elle l'avait fait, les essais auraient été arrêtés et les décès évités. Malheureusement, quand des biologistes pensent qu'ils ont découvert un traitement miracle, qui guérit en toute sécurité, ils perdent parfois leur objectivité face à ce nouveau traitement. Au cours de tous les essais cliniques, quels qu'ils soient, les comités de contrôle doivent être immédiatement et précisément informés des difficultés qui surgissent.



Dusan Petric

Phase I : contrôle de l'innocuité



Del Brown, Gamma Liaison

L'ENDOSTATINE, une substance qui fait régresser les tumeurs chez le souris, est en cours d'essai clinique (phase I) dans des hôpitaux du monde entier.

Nombre de volontaires : 10 à 100, en bonne santé

Objectif : Évaluation de la dose maximale du médicament administrable sans risque

Durée moyenne : un an et demi

Coût moyen : 60 millions de francs

Lors de la première étape d'un essai clinique, les médecins examinent l'innocuité d'un médicament et la dose maximale que l'on peut supporter. Le médicament est administré à des volontaires (en général en parfaite santé et rémunérés pour leur participation au test) qui courent un risque, puisque la substance n'a jamais été testée sur l'homme. La première dose initiale est toujours très faible, afin de minimiser les risques de réaction délétère. Lorsque les médecins augmentent progressivement les doses, les risques qu'un incident ne survienne augmentent. Quand on craint des effets secondaires notables, on pratique les tests de phase I sur des personnes touchées par la maladie que le médicament est censé traiter. Les risques encourus sont alors compensés par les bénéfices escomptés.

Évidemment, tout test sur l'homme est précédé par l'étude d'animaux, mais on ne détecte alors pas les vertiges, les nausées ou les symptômes psychologiques qui sont parfois provoqués par les principes actifs. Parfois même, bien que cela soit extrêmement rare, certains volontaires subissent des effets secondaires graves, que les essais sur l'animal n'avaient pas révélés.

Les équipes chargées des essais cliniques surveillent étroitement les personnes traitées, observant constamment leur comportement et leur état général. De plus, pour détecter rapidement d'éventuelles complications, les médecins vérifient régulièrement la pression artérielle et la température corporelle, ils font des prélèvements de sang, recueillent les urines et surveillent les symptômes que les études sur l'animal auraient pu révéler. Ils mesurent également la concentration en médicament dans le sang ou dans les tissus, afin de déterminer comment le médicament diffuse dans l'organisme, à quel rythme il atteint une concentration thérapeutique et à quelle vitesse il est éliminé. Toutes ces informations déterminent la dose maximale administrable sans risque.

Les médecins, le public et les laboratoires pharmaceutiques ont intérêt à ce que les nouvelles substances thérapeutiques soient testées rapidement et minutieusement, afin que les nouveaux médicaments soient disponibles le plus vite possible. Si les motivations du public sont d'ordre humanitaire, celles des médecins sont parfois plus ambiguës : ils souhaitent que leurs patients bénéficient du meilleur traitement, mais ils sont également intéressés financièrement à la participation de ces malades à un essai clinique. Enfin, les laboratoires pharmaceutiques ont intérêt à ce que les essais soient rapides : plus un essai est court, moins il coûte cher et plus la commercialisation peut commencer rapidement (le laboratoire bénéficie alors plus longtemps de la protection de ses médicaments par les brevets déposés).

La vitesse d'un essai clinique dépend du nombre de chercheurs et de malades qui y participent : plus vite les résultats sont récoltés, plus tôt on peut les interpréter. Par exemple, une prise quotidienne d'aspirine prévient les récurrences d'infarctus chez 1,5 pour cent des personnes cardiaques. Il faut administrer de l'aspirine à un très grand nombre de personnes pour prouver l'existence de cet effet. L'effet de l'aspirine semble minime, mais un traitement par cette molécule ne coûte que quelques centaines de francs par an, tandis que la prise en charge d'une personne ayant eu un infarctus atteint des centaines de milliers de francs.

Pour augmenter le nombre de participants aux essais cliniques et pour obtenir des résultats rapides, on étend les essais cliniques à plusieurs hôpitaux du monde entier. Ainsi, les malades, plus nombreux, représentent mieux la variété des personnes qui seront peut-être, un jour, traitées par la substance évaluée.

Malgré les avantages de ces essais internationaux, ces tentatives sont critiquées. Certains reprochent aux laboratoires pharmaceutiques de tester, dans les pays en développement, des substances (notamment contre le VIH et le SIDA) qui seront beaucoup trop chères pour être utilisées dans ces pays. Ce n'est pas la méthode la plus éthique des essais cliniques qui est ici en cause, mais la politique de la médecine mondiale : la question est de trouver des moyens légaux et financiers afin que les peuples les plus démunis aient accès aux soins. De surcroît,

lorsque les essais cliniques sont très vastes, le nombre des informations recueillies devient considérable (une centaine de pages de notes par personne). La collecte et le contrôle des résultats sont en grande partie responsables du prix des essais cliniques.

On évite la difficulté avec les essais simplifiés à grande échelle : les médecins ne recueillent que les détails absolument nécessaires (les coordonnées

des personnes et un simple questionnaire indiquant si, à la fin du traitement, le patient se sent mieux, pareil ou moins bien). L'ensemble des données tient sur une carte postale qui est envoyée au laboratoire.

Ainsi on obtient, à un coût bien inférieur, des résultats sur des dizaines de milliers de personnes, de sorte que l'on identifie les moindres effets d'un médicament.

Néanmoins, ces essais simplifiés à grande échelle ont un défaut : on ne peut pas les utiliser pour tester une nouvelle substance, dont on ignore totalement les effets secondaires. Il est difficile de donner à de

nombreuses personnes une molécule dont on n'a jamais prouvé l'innocuité et dont les bienfaits restent hypothétiques. Les médecins utilisent surtout les essais simplifiés à grande

Phase II : établissement du protocole

Nombre de volontaires : 50 à 100 malades atteints de la maladie à traiter

Objectif : déterminer quelles personnes et combien devraient participer à la phase finale de l'essai ; premières estimations des doses efficaces et des durées de traitement

Durée moyenne : deux ans

Coût moyen : 120 millions de francs

Avec les tests de la phase II, on cherche les conditions expérimentales qui permettront, lors de la phase finale de l'essai, d'obtenir un résultat incontestable (l'efficacité du traitement ne sera validée qu'au cours de la phase III). On cherche, par exemple, la posologie optimale et on précise les objectifs du traitement, c'est-à-dire les résultats incontestables que l'on peut obtenir. Ainsi, lorsque l'on teste un nouvel antibiotique, on vérifie que l'objectif est bien atteint en constatant que le malade traité n'est plus infecté à l'expiration du traitement. Comme les traitements testés ne donnent pas toujours des résultats aussi tranchés, les objectifs sont souvent plus modestes : par exemple, lors d'un traitement contre le VIH, on observera seulement que la progression vers le stade SIDA a été ralentie par la substance administrée ; au cours du test d'un composé anticancéreux, on observera que le taux de décès a diminué.

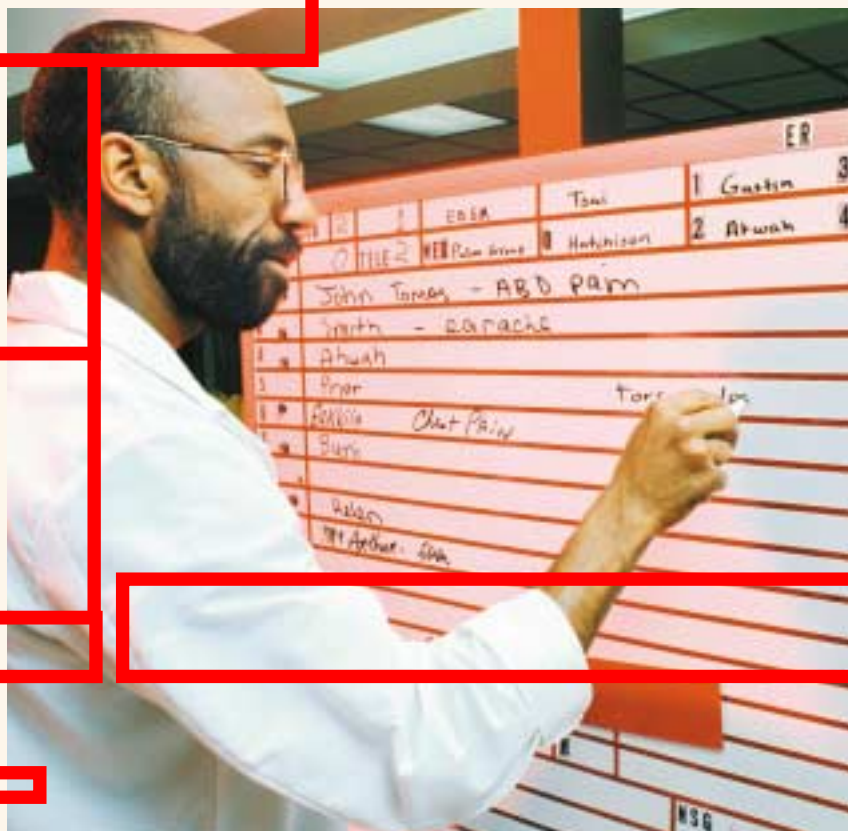
Pour la phase II, on introduit un groupe témoin. Les maladies progressent de façon très différente selon les personnes (on constate même, parfois, des rémissions spontanées), de sorte que l'on doit distinguer les rémissions naturelles des guérisons dues au traitement. Cette distinction est révélée par le groupe témoin, à qui l'on administre soit un placebo, soit le meilleur traitement existant au moment de l'essai clinique.

Le groupe témoin montre aussi les problèmes de santé qui surviennent chez les malades étudiés, en l'absence de toute administration du médicament testé. Imaginons qu'un médicament contre l'hypertension artérielle soit soupçonné de déclencher des nausées. On ne prend ces craintes en considération que si l'effet se manifeste plus dans le groupe traité que dans le groupe témoin.

Dans le cas idéal – l'essai en double aveugle –, ni les médecins ni les malades

ne savent qui est dans le groupe traité et qui est dans le groupe témoin. Pendant une phase II, on vérifie attentivement que la procédure en double aveugle est bien respectée : les comprimés de placebo doivent, par exemple, être identiques à ceux du médicament testé, et administrés de la même façon.

On est parfois contraint d'interrompre une procédure menée en double aveugle : quand le médicament testé déclenche un effet secondaire, même modéré, les patients devinent vite qu'ils font partie du groupe traité. On considère également qu'il n'est pas éthique, lors d'évaluations de procédures chirurgicales, de soumettre des patients à une anesthésie et à une intervention chirurgicale placebo. Quand on connaît les personnes traitées par le médicament en cours d'évaluation, c'est comme si l'on finissait de mettre au point les conditions de la phase III, avant même de l'avoir abordée.



TOUTES LES INFORMATIONS concernant les malades traités par le médicament en cours d'évaluation ou par le placebo sont répertoriées soigneusement au cours de la phase II, lorsqu'il s'agit de déterminer la dose et la durée optimales du traitement qui seront utilisées en phase III.

échelle pour évaluer l'efficacité de traitements connus et approuvés.

Aujourd'hui, on perçoit un accès à la phase III des essais cliniques. La durée moyenne de tous les essais cliniques entrepris entre les années 1996 et 1998 était égale à 5,9 années, alors qu'elle était de 7,2 années entre les années 1993 et 1995. Pourtant, les essais

cliniques restent une lourde charge, de sorte que, même quand les résultats d'un essai sont ambigus, les comités d'éthique ont du mal à fournir quelque information utile.

Que faire quand les essais de phase III laissent transparaître un effet favorable du médicament testé, mais que l'effet observé est trop faible pour

être statistiquement convaincant? Les statisticiens ont mis au point des méthodes pour rassembler les résultats de tous les essais préalables d'un même type afin d'en tirer des informations: les «méta-analyses» restent controversées. On ne peut certainement pas valider un résultat au moyen d'études qui toutes ont échoué. Quelle est la validité des méta-analyses? Les résultats risquent d'être faussés si les études retenues ne sont pas sélectionnées avec soin. En revanche, une méta-analyse bien faite autorise l'interprétation d'une grande quantité de données contradictoires, mais les résultats ne sont généralement pas considérés comme définitifs.

Phase III : test final

Nombre de volontaires : 300 à 30 000 personnes (ou davantage), atteintes de la maladie à traiter

Objectif : savoir si le traitement est efficace et quels sont les effets secondaires

Durée moyenne : trois ans et demi

Coût moyen : 250 millions de francs

La phase III, la dernière étape d'un essai clinique, est mieux connue que les deux premières. Des centaines, voire des milliers, de personnes participent à ces tests. À ce stade, on a généralement défini au moins un groupe de personnes susceptibles de bénéficier du traitement, on a une idée assez précise des bénéfices escomptés et l'on a défini la meilleure façon de l'administrer. La phase III d'un essai clinique sert surtout à confirmer l'efficacité d'un nouveau médicament.

Quand, après une analyse statistique rigoureuse, le médicament testé se révèle être notablement plus efficace que le traitement de référence, on parle alors d'essai pivot. En général, l'Agence européenne du médicament et l'Agence américaine de la santé (FDA) exigent deux essais pivots pour prouver l'efficacité d'un nouveau traitement, mais, quand le premier essai est suffisamment convaincant, l'autorisation de mise sur le marché peut être délivrée.

Quand les résultats d'une phase III ne sont pas concluants, diverses options sont envisageables. En analysant l'énorme masse des informations recueillies, les médecins peuvent découvrir, à l'intérieur du vaste groupe testé, un échantillon plus restreint de personnes qui semblent avoir bénéficié du traitement. On refait alors un essai de phase III avec un petit groupe de personnes, afin de confirmer que le médicament est vraiment bénéfique. En pratique, la première série des résultats obtenus lors d'un essai de phase III n'est pas toujours assez convaincante, et plusieurs essais complémentaires sont alors entrepris.

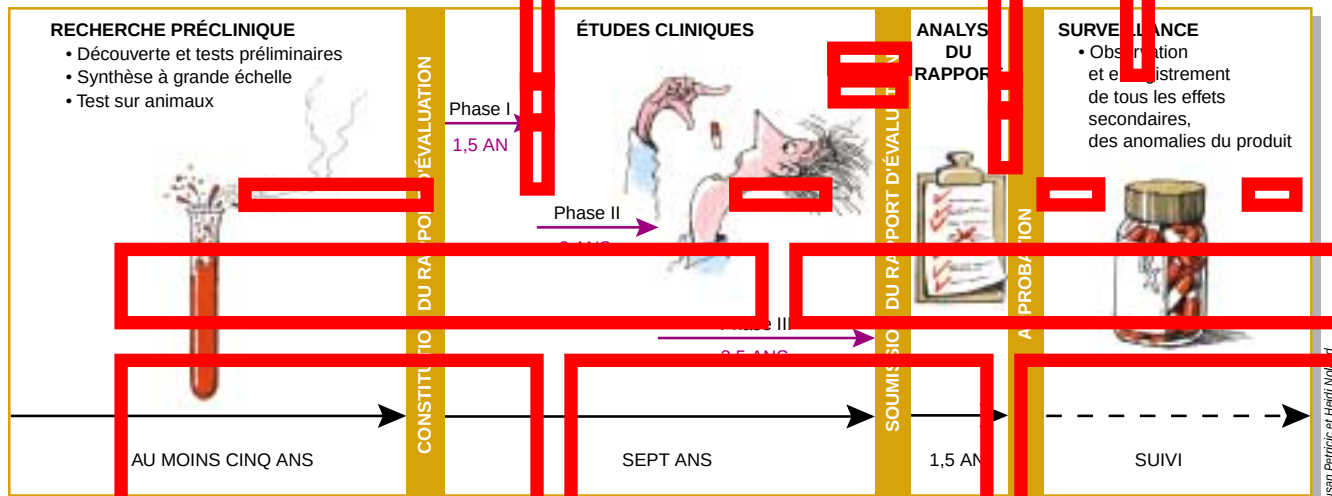


LORS D'UN ESSAI DE PHASE III, on ignore encore si le traitement testé est réellement efficace. Ici le malade participe à un essai de phase III visant à l'évaluation d'un traitement par laser d'une maladie de l'œsophage.

Données financières

Qui paie la recherche clinique et qui bénéficie des résultats? Pendant de nombreuses années, les laboratoires pharmaceutiques ont fait eux-mêmes la majeure partie du travail imposé par les essais cliniques, engageant des médecins qui organisaient et réalisaient les tests, des observateurs qui vérifiaient que les données étaient correctement recueillies, des statisticiens qui analysaient les résultats, des secrétaires qui saisissaient les données, et les personnes qui assuraient les tâches administratives et la coordination de l'ensemble, sans oublier les médecins et les infirmières qui s'occupaient des malades enrôlés dans l'essai. Une telle organisation coûte des centaines de millions de francs, voire des milliards de francs: on comprend que les laboratoires pharmaceutiques souhaitent récupérer leur investissement aussi rapidement que possible.

Avec de telles sommes en jeu, les questions éthiques deviennent importantes. Bien que les essais cliniques soient généralement bien menés, certains médecins participant à des essais cliniques se sont parfois plaints de ce que les laboratoires coordonnant l'essai imposent un devoir de réserve: ils ne doivent révéler ni à leurs collègues ni au public qu'un traitement est inefficace. Éviterait-on cette difficulté si les essais cliniques étaient financés par les agences publiques de santé? Ce mode d'organisation, parfois adopté dans certains pays, évite les conflits d'intérêt et garantit généralement une meilleure tenue des études.



LA MISE AU POINT D'UN MÉDICAMENT dure plusieurs années, des recherches préliminaires en laboratoire jusqu'aux tests sur l'homme, à l'approbation par les agences du médicament et, enfin, au suivi après commercialisation. Grâce à certaines procédures, la durée a été parfois réduite, mais un essai approfondi continue à prendre beaucoup de temps.

Toutefois, l'allocation de fonds publics à la recherche de nouveaux médicaments, dont les laboratoires pharmaceutiques tireront profit, est également discutable. Jusqu'à présent, les pays libéraux n'ont financé que des essais concernant des médicaments dont on savait qu'ils ne rapporteraient pas beaucoup ou qui présentaient trop de risques pour intéresser l'industrie : ce fut, par exemple, le cas des essais qui ont confirmé l'intérêt de l'aspirine dans la prévention des récidives. Bien que le nombre de personnes bénéficiant de ce traitement soit important, l'aspirine est si bon marché qu'aucun laboratoire pharmaceutique n'a voulu organiser l'essai clinique : les profits ultérieurs n'auraient pu justifier le coût de l'essai.

Une troisième solution est parfois retenue : on confie les essais cliniques à des sociétés de service souvent nommées CRO (pour *Contract Research Organization*, organisation de recherche sous contrat). Indépendantes des laboratoires pharmaceutiques, elles se chargent des essais cliniques testant souvent plusieurs médicaments dans plusieurs pays. Ainsi, ces équipes sous contrat devraient permettre aux laboratoires pharmaceutiques de réduire notablement les coûts inhérents aux études les plus lourdes. En utilisant leurs services, on évite aussi des problèmes humains : quand un essai échoue, les laboratoires n'ont pas à congédier ou à reclasser toutes les personnes qui ont participé à l'essai.

Comme ces sociétés de service ne sont pas intéressées financièrement à

la vente des médicaments, elles ne devraient être confrontées à aucun conflit d'intérêt : elles ne vendent que leurs services, lesquels doivent entièrement satisfaire les exigences et les critères des autorités sanitaires. Afin de minimiser les éventuels conflits d'intérêt, on demande désormais aux chercheurs un rapport qui précise le financement du travail référencé et toute information sur d'éventuels conflits d'intérêt.

Dans l'immédiat, les essais cliniques changeront peu, même si les tentatives d'amélioration se multiplient. Un essai clinique idéal devrait être fiable, rapide et bon marché. Généralement, les essais ne satisfont qu'à deux des trois exigences : un essai rapide et peu coûteux ne peut être fiable.

De surcroît, aucun médicament ne sera jamais parfait, et on ne peut dire qu'un médicament ne guérira jamais tous les malades et que la plupart auront des effets secondaires chez une petite proportion des personnes traitées. Les essais cliniques restent le meilleur moyen d'évaluation des nouveaux

médicaments ou des nouveaux dispositifs médicaux et, en fait, ils sont d'une grande fiabilité : aucun autre produit que le médicament n'offre autant de garanties d'efficacité et de sûreté.

La majorité du corps médical considère les essais cliniques conduits en double aveugle comme une procédure inévitable d'évaluation d'un traitement. La méthodologie évolue, et certains tests récents prouveront vraisemblablement leur utilité. Une meilleure coopération entre les médecins et les agences du médicament du monde entier aboutira à la sélection de traitements encore plus efficaces et à l'élimination progressive des médicaments obsolètes. Longtemps, les charlatans ont fait des promesses infondues, abusant de la crédulité des malades les plus vulnérables. Au contraire, les essais cliniques représentent la méthode la plus objective pour vérifier l'efficacité d'un traitement ; ils durent longtemps et sont onéreux, exigeant d'incessants contrôles et des améliorations, mais ils sont tout à fait dignes de confiance.

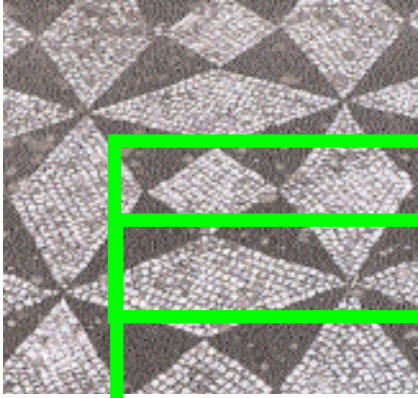
David ZIVIN est professeur dans le Département de neurosciences de l'Université de San Diego.

Bert SPILKER, *Guide to Clinical Trials*, Raven Press, New York, 1991.

National Institute of Neurological Disorders and Stroke rt-PA Stroke Study Group, *Tissue Plasminogen Activator for Acute Ischemic Stroke*, in *New England Journal of Medicine*, vol. 33, n° 24, pp. 1581-1587, 14 décembre 1995.

International Stroke Trial Collaborative Group, *International Stroke Trial (IST): A Randomized Trial of Aspirin, Subcutaneous Heparin, Both, or Neither among 19 435 Patients with Acute Ischemic Stroke*, in *Lancet*, vol. 349, n° 9065, pp. 1569-1581, 31 mai 1997.

Ralph SNYDERMAN et Edward W. HOLMES, *Oversight Mechanisms for Clinical Research*, in *Science*, vol. 287, n° 5453, pp. 595-597, 28 janvier 2000.



Simples pavés

IAN STEWART

Une méthode générale pour créer des pavages du plan.

Le pavage est une activité mathématique antique, déjà pratiquée par les Égyptiens et les Grecs. Créés plus tard, près de Rome, les mosaïques de la villa d'Hadrien sont des chefs-d'œuvre du pavage. Le problème est le suivant : on fixe une ou plusieurs formes – les pavés – et l'on cherche à les utiliser pour couvrir un plan ou, au moins, une grande étendue plane. Parfois, la répétition de groupes colorés engendre des œuvres d'art (voir *L'art du pavage*, Pour la Science, août 1999). Il y a peu, un lecteur suisse, Michel Châtelain, m'a fait part d'une approche toute différente, où la forme du pavé intervient de façon secondaire : on cherche d'abord comment les pavés doivent s'accoler, puis on détermine quelles formes de pavés conviennent.

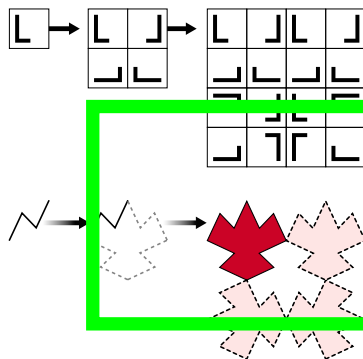
Examinons quelques exemples. Pour commencer, prenons un simple carré, tel qu'on en utilise pour carrelers un mur de salle de bain. Ensuite, en le déplaçant, on s'autorise à le faire tourner ou à prendre son symétrique. La figure 1 montre comment associer quatre carrés pour en faire un plus grand ; des «L» inscrits dans les carrés de base montrent que l'un des quatre pavés a subi une simple translation (on l'a fait glisser latéralement sans tourner), alors que les trois

autres ont subi une rotation ou une réflexion (ils sont orientés de façon inverse, comme dans un miroir), ou les deux à la fois. Translations, rotations et réflexions sont des opérations que les mathématiciens nomment transformations. Si nous reprenons maintenant les quatre transformations qui ont fait passer du carré de base au groupe à quatre pavés et si nous les appliquons à ce groupe de quatre pavés, nous obtenons un motif à 16 carrés : le pavé à quatre carrés devient le quart supérieur gauche du motif, et ses images par réflexion ou par rotation forment les trois autres quarts.

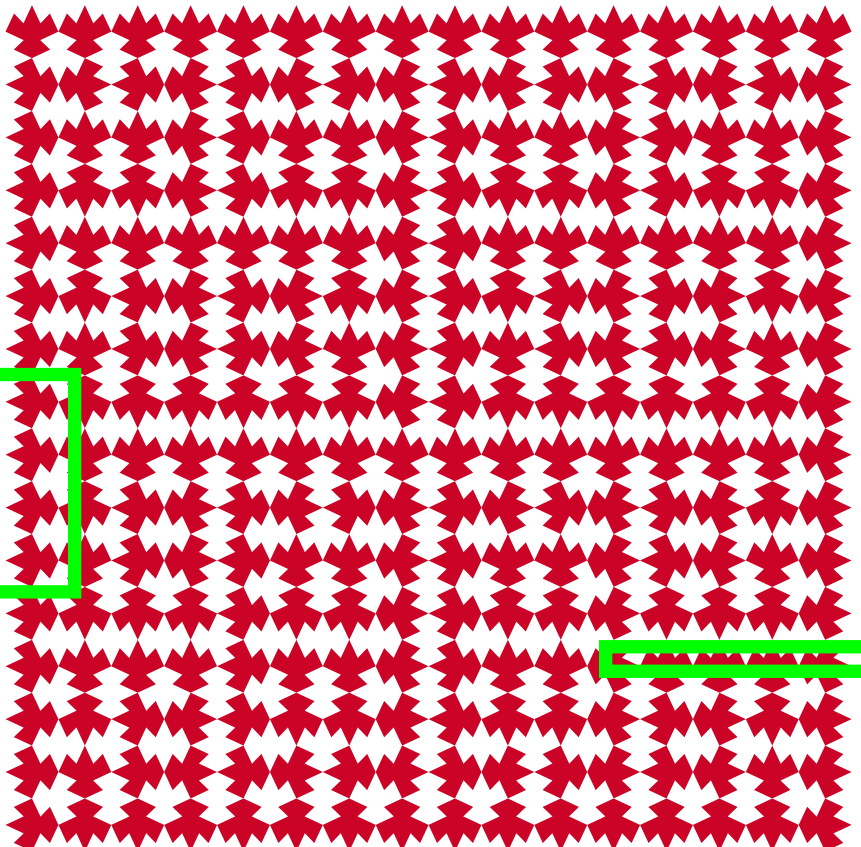
En répétant la procédure, nous obtenons des pavages de 64 carrés, puis de 256 carrés, etc. Chacun de ces pavages successifs est une partie du suivant, si bien que le pavage complet se résume à la répétition d'un seul et unique motif. Selon la manière dont nous opé-

rons, le pavage recouvre tout le plan ou une partie infiniment grande. Par exemple, si nous disposons toujours chaque pavage dans le coin supérieur gauche du suivant, nous avons un quart du plan. Si nous le plaçons alternativement dans le coin supérieur gauche, puis dans le coin inférieur droit, nous pavons le plan entier. Je vous laisse imaginer comment paver un demi-plan (deux quarts de plan juxtaposés).

Abandonnons les carrés marqués d'un L, qui ne sont pas les pavés que nous voulons utiliser et qui nous servent seulement à repérer la série de transformations qui aboutira au pavage final. Pour trouver une forme de pavés qui s'assemblent selon les transformations prévues, on choisit un «générateur», c'est-à-dire une courbe qui s'inscrit dans un carré en joignant les coins inférieur gauche et supérieur droit (afin d'obtenir une forme de pavé fermée, en boucle).



1. On obtient un pavage à partir d'un carré que l'on reproduit en lui appliquant une transformation pour former une figure à quatre carrés (ci-dessus). Ces quatre mêmes transformations donnent ensuite la figure à 16 carrés. Quand on applique ces mêmes transformations à la courbe en N inclinée, on obtient un pavage où sont répétés des pavés en forme d'oiseau (à droite).



Sur la figure 2a, les courbes représentées sont un N incliné. Ensuite, on applique à ce générateur les quatre mêmes transformations qu'aux carrés avec un L .

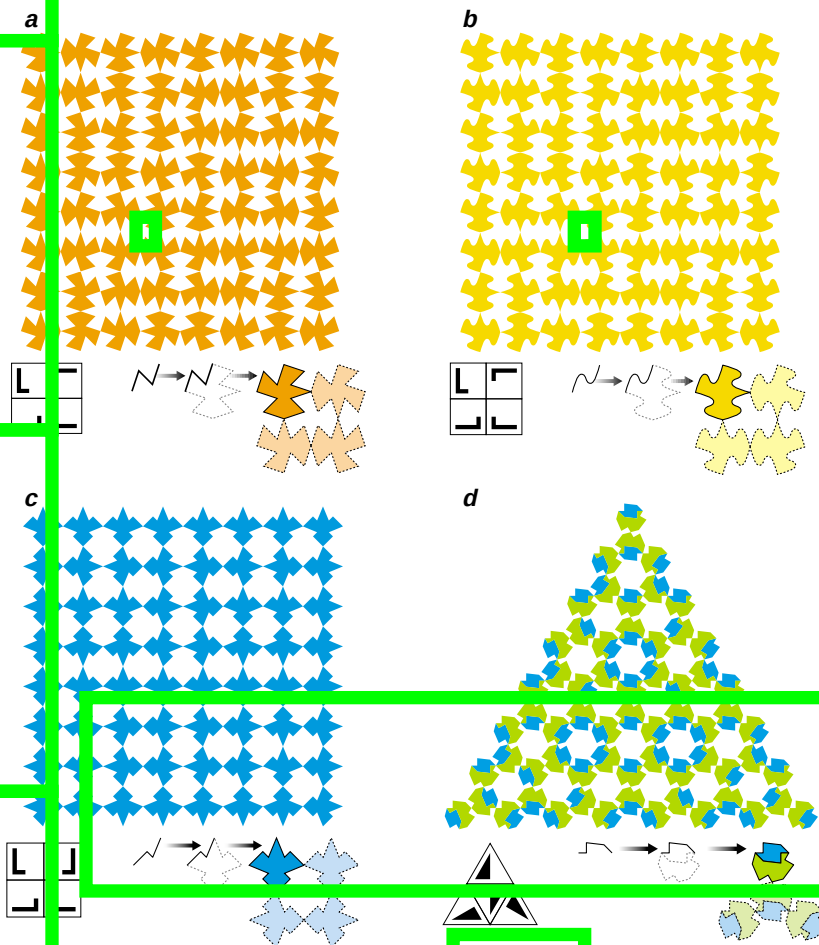
À partir de ce générateur particulier, nous obtenons un pavé dont la forme évoque un oiseau ou un petit fantôme. Comme on l'a fait pour les carrés, on peut répéter les transformations, afin de couvrir une partie du plan.

La figure 2 montre d'autres pavages réalisés avec la même méthode. Quand on utilise le même générateur en forme de N avec une autre série de transformations, on obtient un pavé différent et un nouveau motif (voir la figure 2a). En changeant seulement la forme du générateur, on obtient des pavés différents, mais on conserve le motif (voir la figure 2b). La figure 2c montre notamment que certains générateurs conduisent à des pavages où apparaissent deux formes : ici la forme bleue et la forme blanche.

Les motifs qui apparaissent par ces procédures sont généralement apériodiques : ils ne sont pas la simple répétition d'une forme comme sur un papier peint. Néanmoins, si la série de transformations ne compte que des translations (donc ni rotation ni réflexion), on obtient aussi des pavages périodiques. De même, à partir de notre premier exemple — quatre carrés avec un L , mais tous orientés dans le même sens —, ces transformations ne produiraient que des pavages périodiques.

Évidemment, on peut encore utiliser la méthode pour d'autres pavés. N'importe quel pavé convient si sa répétition crée un pavé plus grand, mais de forme identique. Par exemple, quatre copies d'un triangle équilatéral forment un triangle équilatéral de taille supérieure, qui engendre des motifs remarquables (voir la figure 2d). Je vous invite à tester d'autres formes : les pavages de ce type n'ont pas été systématiquement recensés, de sorte que vous ferez des découvertes intéressantes.

Les mathématiciens cherchent souvent des généralisations, par exemple, aux dimensions supérieures. Or, la méthode de pavage examinée ici fonctionne aussi en trois dimensions : en associant huit copies d'un cube, on obtient un nouveau cube plus gros que le premier. On peut même créer des pavés fractals, c'est-à-dire des formes divisibles en parties qui sont des versions réduites de la forme initiale. D'ailleurs, la méthode de pavage décrite par M. Châtelain se fonde sur certaines des méthodes utilisées pour construire des fractales. C'est un moyen délicieusement simple de créer des dessins merveilleusement complexes.



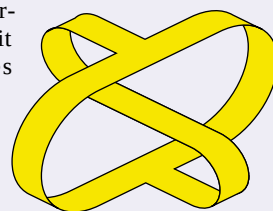
2. On obtient des pavages différents en appliquant des transformations différentes au même générateur en forme de N . le pavé et le pavage seront différents (a). Si l'on conserve les transformations, en modifiant le générateur, la disposition du pavage reste la même, mais le pavé est différent (b). Parfois, cette méthode conduit à plus d'une seule forme de pavés (c). On peut aussi utiliser des triangles équilatéraux pour décrire les transformations (d) : quand les rotations à l'œuvre dans la figure à quatre triangles sont appliquées au générateur, on obtient des pavés qui s'assemblent en motif triangulaire.

Réactions

Dans plusieurs de mes articles récents, nous avons considéré des propriétés topologiques. Du Missouri, Josiah Manning m'a fait parvenir une intéressante variation sur le ruban de Möbius. Souvent réalisé à partir d'une longue bande de papier dont on colle les extrémités après en avoir tourné une de 180 degrés, le ruban de Möbius n'a qu'une seule face et un seul bord. La surface de J. Manning a cette même propriété (voir la figure ci-dessous), bien qu'elle diffère du ruban par des bifurcations.

Cependant, les topologistes se méfient des apparences : d'un point de vue topologique, une tasse à café est identique à une chambre à air, car toutes deux sont des surfaces avec un trou (au milieu de la chambre à air et dans l'anse de la tasse). L'élégante surface de J. Manning est-elle topologiquement équivalente à un ruban de Möbius ? Si elle était en caoutchouc, pourrait-on obtenir le ruban de Möbius en la déformant continuellement ?

Si vous voulez vous amuser à examiner cette question, n'oubliez pas que, pour déterminer une équivalence topologique, vous avez le droit de couper une forme, sous réserve de recoller les deux lèvres exactement comme elles l'étaient initialement (en effet, une même forme topologique peut être plongée dans l'espace de différentes manières). Je donnerai la réponse dans un prochain article.



La montée de la sève

ROLAND LEHOUCQ

Dessins de Bruno Vacaro



Les arbres transportent la sève à des hauteurs vertigineuses par un mécanisme qui n'est ni du pompage ni de l'aspiration, mais qui résulte de la transpiration des feuilles.

L'aspect le plus surprenant de la circulation de la sève dans les végétaux est la hauteur à laquelle ce liquide peut s'élever, plus de 100 mètres pour les plus grands arbres, tels les séquoias. Quel mécanisme est-il capable de faire monter un liquide aussi haut ?

La sève est le sang des végétaux. Elle véhicule l'eau, mais aussi les substances nutritives et les déchets que les différentes parties de la plante doivent recevoir ou éliminer. La circulation se fait à travers des vaisseaux, qui jouent le même rôle que les vaisseaux sanguins d'un animal, constitués d'une structure de cellules mortes vidées de leur protoplasme. Ces vaisseaux forment des conduits continus d'un diamètre compris entre 20 et 400 micromètres selon les plantes. La lignine, paroi des conduits, est un polymère dur et imperméable qui lui confère une bonne résistance mécanique et facilite l'écoulement de l'eau.

Pour boire un liquide avec une paille, il faut aspirer. Lorsque le diamètre de la paille est suffisamment faible, l'aspiration est inutile, car l'eau monte spontanément d'une hauteur inversement proportionnelle au diamètre de la paille. Ce phénomène surprenant résulte de la tension superficielle qui minimise la surface d'un liquide. Une molécule située à l'intérieur d'un liquide est liée à ses voisins par des forces à courte portée. Une molécule située à la surface du liquide est moins entourée, donc moins liée aux autres molécules : son énergie est supérieure. La création d'une interface requiert ainsi une énergie proportionnelle à l'aire de la surface créée. Le quotient énergie/surface est la tension superficielle.

Un liquide en contact avec une surface adopte spontanément la forme qui minimise la somme de son énergie de contact avec l'air et avec la

surface. Ainsi, lorsque l'on plonge une lame de verre dans un liquide, ce dernier monte sur les parois sous l'effet de la tension superficielle. Le petit ménisque que l'on observe sur les parois internes d'un verre d'eau résulte de ce phénomène. Par cette analogie, la sève, dont la tension superficielle est plus élevée que celle de l'eau, monte spontanément dans les plus fins conduits, de moins de un mètre (la montée capillaire est limitée par la gravité). Manifestement, la capillarité n'explique pas l'ascension de la sève dans les arbres.

Comme le mercure qui monte dans un baromètre, ne pourrait-on imaginer que la sève se hisse dans les vaisseaux, poussée par la pression atmosphérique ? Dans un baromètre, la pression atmosphérique soutient une colonne de liquide contre la gravité. La hauteur atteinte est proportionnelle à la densité du liquide. Dans un baromètre à mercure,

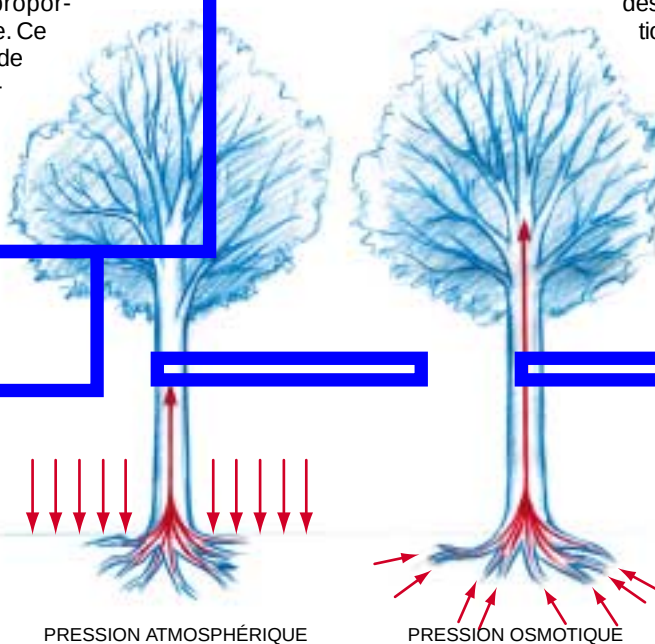
la hauteur atteinte 76 centimètres. L'eau étant 13,6 fois moins dense que le mercure, la hauteur atteinte par l'eau dans un baromètre est de 10,3 mètres. C'est aussi la hauteur à laquelle la sève peut atteindre sous l'effet de la pression atmosphérique qui s'exerce sur le sol et qui se transmet à la sève par l'intermédiaire des racines. C'est insuffisant et l'ascension de la sève dans le tronc des grands arbres semble défier les lois de la pesanteur.

UNE SÈVE TROP SUCRÉE

La chimie peut-elle expliquer le phénomène ? La concentration de la sève en éléments nutritifs varie au cours du cycle annuel. Certains arbres, comme les érables qui donnent un délicieux sirop, ont, au printemps, une sève dont la concentration en sucre est bien supérieure à celle du sol qui entoure les racines. Or, lorsque deux solutions de concentrations différentes sont séparées par une membrane perméable à l'eau, mais imperméable au soluté (comme l'est la paroi des racines), l'eau diffuse de la solution la moins concentrée vers la solution la plus concentrée.

Cette diffusion induit une pression, nommée pression osmotique, explicable par une analogie. Un filet de pêcheur figure la membrane et les poissons représentent le sucre. Imaginons qu'il y a des poissons à l'intérieur du filet (la concentration à l'intérieur est supérieure à celle qui règne à l'extérieur). L'eau pouvant passer librement par les mailles du filet, la pression hydrostatique s'équilibre. En revanche, les poissons qui sont coincés dans le filet exercent par leurs chocs successifs une pression sur les mailles, la pression osmotique. L'eau ne joue pas de rôle sur le volume du filet, seuls les poissons y contribuent.

UN ARBRE BAROMÉTRIQUE ?





menterait son énergie superficielle d'une quantité égale au double du produit de la tension superficielle par la section de la colonne. Autrement dit, pour fractionner la colonne du liquide, il faudrait exercer une force de traction supérieure aux forces de cohésion entre les molécules situées de part et d'autre de la surface de séparation. La sève peut monter si haut parce qu'elle supporte les contraintes de traction de quelques atmosphères, imposée par la transpiration foliaire (plusieurs centaines d'atmosphères sont nécessaires pour rompre une colonne d'eau).

Dans une certaine mesure, le liquide se comporte comme un solide dont la résistance à la traction est très grande : le Soleil tire un fil de sève solide des racines jusqu'aux feuilles. La sève n'est donc pas poussée par le bas, mais bien tirée vers le haut. Seulement, la sève n'est pas un solide et elle subit des tensions qui peuvent créer des bulles, néfastes à sa bonne circulation.

La pression osmotique de la sève des érables vaut environ 2 atmosphères et permettrait à la sève de s'élever à près de 21 mètres. C'est encore insuffisant, mais la pression osmotique contribue à la montée printanière de la sève, lorsque la sève des racines est concentrée en matières nutritives produites lors de l'été précédent.

LES FEUILLES SUENT

La solution à notre problème provient de ce que la circulation est ouverte : l'eau peut sortir de l'arbre. Le moteur qui fait monter la sève est le Soleil. Le courant de sève circule des racines les plus fines jusqu'aux capillaires des feuilles, où plus de 90 pour cent de l'eau de la sève s'évapore. Ainsi, une forêt d'un hectare évapore entre 3 000 à 4 000 tonnes d'eau par an. Cette évaporation assure la régulation thermique de la plante (l'évaporation refroidit), mais aussi la circulation de la sève.

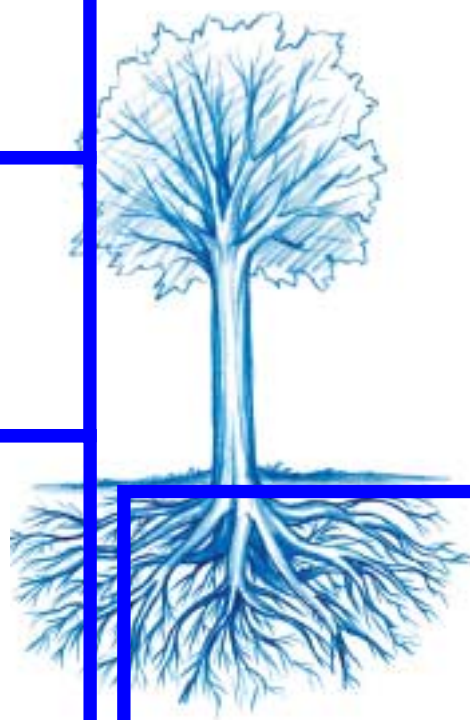
Grâce à la capillarité, l'eau qui s'évapore par les pores de la feuille est remplacée par celle qui est amenée par la sève située plus bas. Cette évaporation tire du liquide vers le haut, car la colonne, ininterrompue depuis les racines, se déplace en bloc. Le fractionnement d'une colonne de liquide en deux parties aug-

Au voisinage des racines, la pression de la sève est proche de la pression atmosphérique. À mesure que l'on s'élève, la tension due à l'évaporation fait que la pression de la sève diminue jusqu'à -4 atmosphères dans les canaux des feuilles d'un arbre dont la hauteur dépasse 50 mètres, alors que la pression qui s'exerce sur les feuilles est de une atmosphère. On tire tant sur les molécules du liquide qu'elles s'éloignent et peuvent devenir gazeuses. Ainsi, la baisse de pression peut faire bouillir la sève liquide : c'est la cavitation. Ce phénomène de cavitation fait apparaître une microbulle qui, envahissant une fraction appréciable du conduit, arrête l'ascension. L'arbre subit une « embolie ». Les arbres ont donc développé des moyens variés pour surmonter cette difficulté. Pour la plupart des espèces, l'embolie est très localisée et seuls les vaisseaux où la sève ne circule plus deviennent fonctionnels, soit de nouveaux tubes conducteurs formés au printemps sont utilisés.

UNE LENTE MONTÉE

À quelle vitesse monte la sève ? L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau provient du rayonnement solaire. On

calculerait ainsi une vitesse de la sève dans les feuilles de 0,4 millimètre par heure, directement proportionnelle au flux solaire. Plus bas, dans le tronc, la propagation dépend essentiellement du dia-



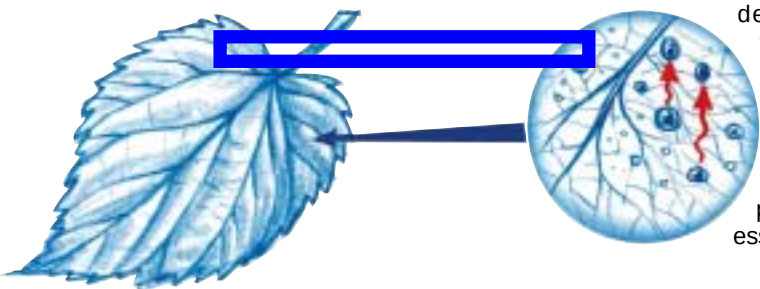
mètre des conduits et de la viscosité de la sève. On obtient des vitesses de l'ordre de quelques mètres par heure. Encore plus bas, pour pénétrer dans les racines, l'eau doit traverser la paroi des cellules des racines dont l'épaisseur est d'environ dix nanomètres. Cette diffusion, relativement lente, se fait à des vitesses de l'ordre de 0,04 millimètre par heure. Or, les quantités d'eau qui traversent les racines, le tronc et les feuilles sont identiques, car le débit se conserve. Comme le débit est le produit de la vitesse par la surface, plus la vitesse est faible, plus la surface doit être importante. Ainsi, pour conserver le débit, la surface des feuilles doit être environ 2 500 fois supérieure à celle du tronc et la surface des racines doit être dix fois plus grande encore. En regardant un arbre, on imagine que son réseau de racines est bien plus développé que son feuillage visible. Dans les racines, la plus grande partie de cette surface résulte de la présence d'innombrables radicelles.

Roland LEBOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

S. Delrot, Les sèves et leur circulation, in Dossier Pour la Science, De la graine à la plante, janvier 2000.

A. Mineyev, Why do trees grow so tall, but not taller?, in Quantum, p. 4, janvier / février 1994.

M.H. Zimmermann, How sap moves in trees, in Scientific American, p. 132, mars 1963.



L'ADN au microscope

DENIS MICHEL • ÉRIC LE CAM

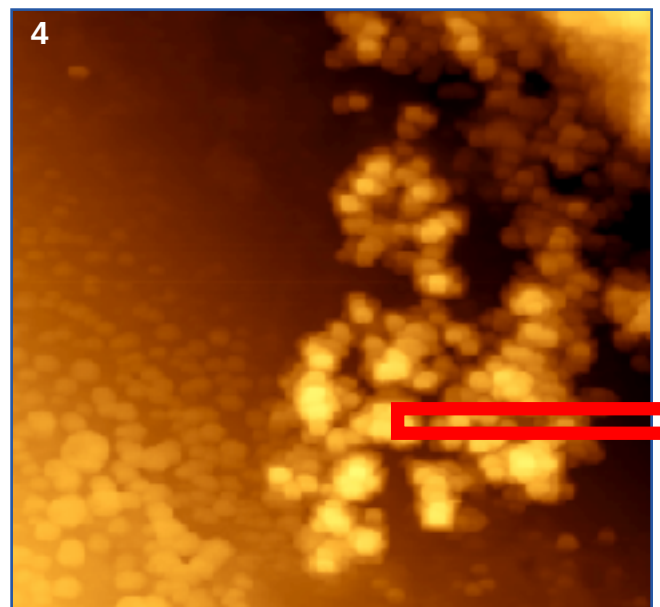
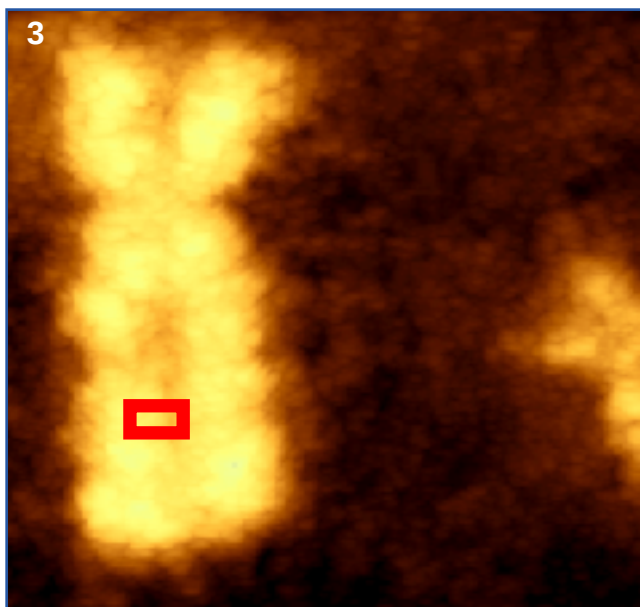
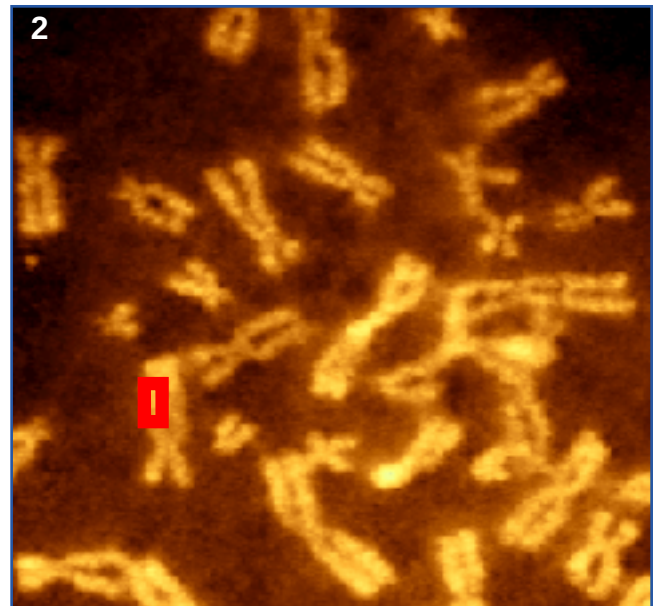
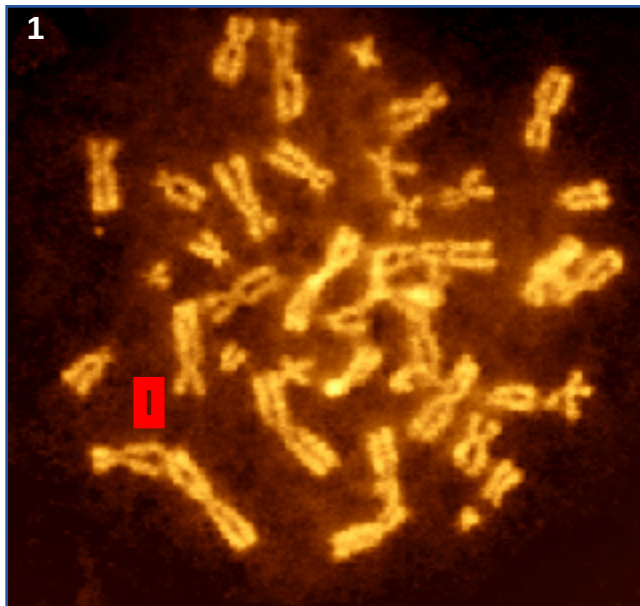
La microscopie à force atomique permet l'exploration du matériel génétique.

L'ADN est une molécule dont la longueur est supérieure à un mètre : comment tient-elle dans le noyau, qui mesure dix micromètres (dix millièmes de mètre) de diamètre ? Les biologistes savent que des protéines rassemblent la molécule et qu'un des états le plus condensés de l'ADN correspond à son organisation en chromosomes,

au moment de la division cellulaire. L'étude des divers états de compaction de l'ADN est difficile. On utilise classiquement plusieurs sortes de microscopie (optique, électronique) afin de couvrir une large gamme de grossissements ; chaque microscopie impose des préparations spéciales. Aujourd'hui la microscopie à force atomique permet l'analyse

aux différentes échelles dans la continuité et sans coloration spécifique. De surcroît, les échantillons d'ADN peuvent être étudiés directement en solution, ce qu'aucune autre technique ne permet de faire à l'échelle de l'ADN.

Inventée en 1986, la microscopie à force atomique utilise une pointe très fine (l'extrémité a un diamètre de quelques nanomètres, ou milliardièmes de mètres) que l'on fait vibrer au-dessus de la surface explorée. Les forces interatomiques perturbent le mouvement de vibration de la pointe ; en détectant ces perturbations, alors qu'on déplace la pointe au-dessus de toute la zone explorée, on obtient des images, de l'échelle submillimétrique jusqu'à celle du nanomètre tout en conservant la même sensibilité sur la hauteur des objets (jusqu'à 0,01 nanomètre).



1 Ensemble des chromosomes d'une cellule humaine au moment de la métaphase de la division cellulaire (côté du carré : 5 micromètres).

2 Un grossissement fait apparaître, entre les chromosomes, une teinte rouge : elle résulte de l'accumulation des débris cellulaires déposés au cours de la préparation de l'échantillon (côté : 30 micromètres).

3 Un chromosome ; ses deux bras contiennent la même information génétique. De ce fait, lors de la division cellulaire, l'information sera répartie dans les deux cellules filles (côté : 7 micromètres).

4 À ce grossissement, seule une partie du bras est visible en haut à droite,

mais, surtout, on aperçoit le chromosome partiellement débobiné. Le «filament» qui apparaît ici est fortement structuré : l'ADN est regroupé par des protéines en une structure compacte, formant un «collier de perles» (côté : 5 micromètres).

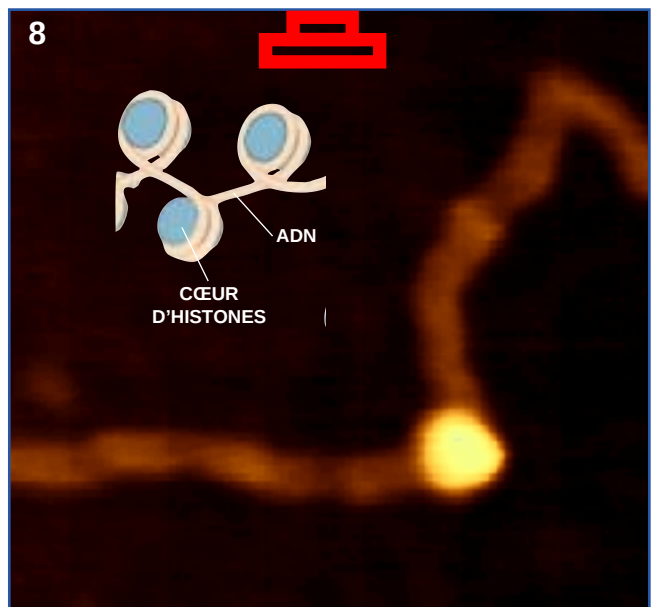
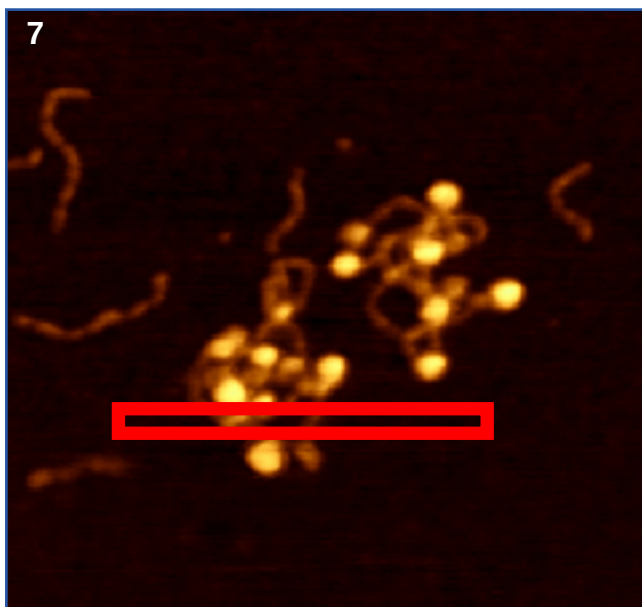
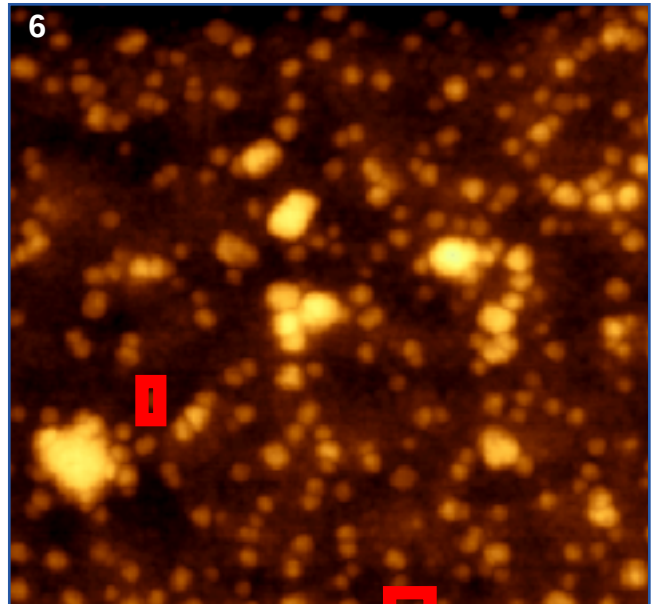
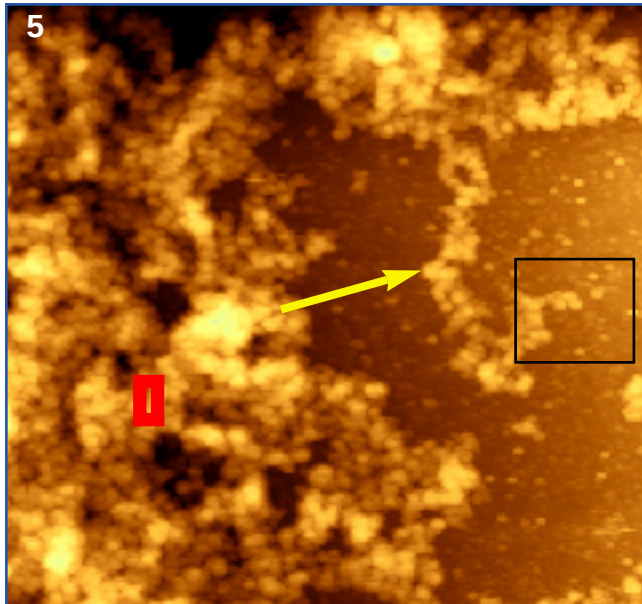
5 Grossissement de l'image précédente. On voit (flèche) un niveau de compaction inférieur qui se présente sous la forme d'une fibre de 30 nanomètres (côté : 1 micromètre).

6 On a grossi la partie qui figurait dans le cadre de l'image précédente. Là où rien n'apparaissait, on aperçoit maintenant un filament moins compact et on commence à discerner les protéines autour desquelles s'enroule la molécule d'ADN, structure communément désignée «en collier de perles» (côté : 1,2 micromètre).

7 Pour étudier ces structures, on a isolé les protéines nommées histones et on les a placées au contact d'une molécule d'ADN isolée par ailleurs ; ce dernier s'enroule alors autour des histones (côté : 0,4 micromètre).

8 Voici l'état le moins compacté de l'ADN : il s'enroule sur un «cœur d'histones» c'est-à-dire un édifice composé de plusieurs protéines (côté : 0,2 micromètre).

Denis MICHEL et Éric LE CAM travaillent au Laboratoire CNRS de microscopie moléculaire et cellulaire, à l'Institut Gustave Roussy (Villejuif). Les échantillons ont été préparés dans le laboratoire de Bernard Dutrillaux, à l'Institut Curie.



Sciences de la Terre

Histoire solaire et climatique

Élisabeth Nesme-Ribes et Gérard Thuillier. Éditions Belin, 1999. (240 pages, 130 francs)

Tu apparais dans la pensée de la beauté

Dans l'horizon du ciel, disque vivant, créateur de vie...

Tu t'élevais, tes rayons touchant pourtant la Terre...

Tu te couches dans l'horizon occidental,

L'univers est dans les ténèbres, comme mort.

Grand hymne à Aton, *xiv^e siècle avant notre ère*

Avec la même dévotion que les Égyptiens pharaoniques, Élisabeth Nesme-Ribes a consacré sa vie à reconstituer les variations de l'activité du Soleil et à explorer l'impact de ces variations sur le climat de notre planète. *L'Histoire solaire et climatique*, écrit en collaboration avec Gérard Thuillier, qui a mené cet ouvrage à son terme après la disparition de son coauteur, fait revivre toute l'épopée scientifique de E. Nesme-Ribes à l'Observatoire de Paris.

D'abord, elle a dû prouver à une communauté scientifique moderne, habituée aux télescopes pilotés par ordinateur que les observations réalisées avec des instruments primitifs sont de tout premier ordre et parfaitement fiables quand elles sont faites par Christiaan Huygens (1629-1690), par Jean-Dominique Cassini (1625-1712), par Jean Picard (1620-1682), par Philippe de La Hire (1640-1718) et par leurs successeurs. Les deux auteurs font revivre tous ces savants, qui ont abordé les grands problèmes théoriques et pratiques de l'époque, telles la cartographie de la France, la détermination de la forme de la Terre (est-elle une orange, aplatie aux pôles, comme le pensait Newton, ou un melon, plutôt en fuseau, comme le croyait Descartes?), la détermination des longitudes (indispensable à la navigation) et la mesure précise du temps. Avec leurs homologues anglais, italiens et suédois, ils constituaient une école européenne active, au sein de laquelle les échanges d'information étaient nombreux et tout aussi passionnés qu'aujourd'hui.

Ce sont ces hommes qui lancent le premier programme d'observation scientifique systématique du Soleil et qui suivent les taches solaires, découvertes 2 000 ans avant par les astronomes chinois. É. Nesme-Ribes et G. Thuillier rapportent leurs avancées, et enchaînent en faisant le point des connaissances actuelles sur le Soleil et sur son fonctionnement, en tenant compte des résultats les plus récents de la conquête spatiale. Ils insistent sur la variabilité de l'énergie émise par le Soleil et sur les nombreux cycles solaires qui ont été

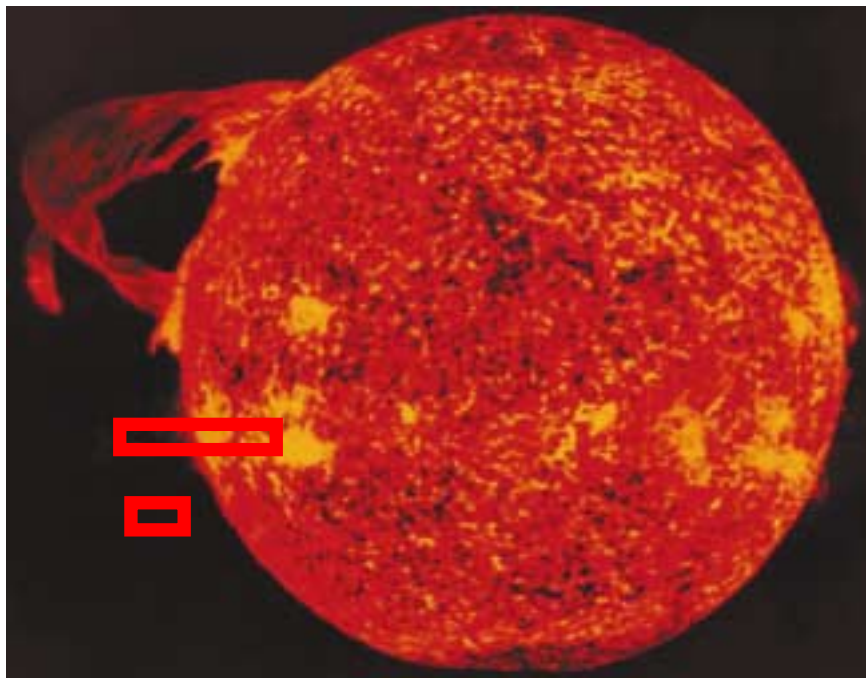
découverts au fil des ans par des observateurs attentifs.

Comme dans les meilleurs romans policiers, ils rassemblent tous les indices qui permettent de reconstituer les variations de l'activité solaire et de l'énergie reçue par la Terre pour conclure que le Petit Âge glaciaire du *xviii^e* siècle coïncide avec une période de très faible activité solaire aujourd'hui nommée Minimum de Maunder. Le lecteur comprend ainsi l'extrême sensibilité du climat terrestre : la moindre variation du bilan énergétique est amplifiée par des rétroactions qui proviennent de modifications du cycle de l'eau, du pouvoir réflecteur de la surface de la planète ou, encore, de la circulation de l'océan mondial.

É. Nesme-Ribes et G. Thuillier appliquent enfin leurs acquis à l'établissement de quelques scénarios pour les climats du futur : les variations de l'effet de serre dues aux émissions de gaz carbonique, de méthane, etc., et aux dispersions de poussières provoquent des perturbations du bilan énergétique de notre planète qui, dès aujourd'hui, dépassent en amplitude celles qui sont dues aux variations de l'activité solaire depuis trois siècles.

L'Histoire solaire et climatique est un ouvrage très documenté, bien illustré, qui passionnera tous ceux qui s'intéressent à l'évolution de notre planète. Il présente une vision originale du rôle que le Soleil peut avoir joué sur l'évolution du climat de la Terre, notamment durant le dernier millénaire, pendant lequel les hommes ont traversé, non sans souffrances et fureurs, le Petit Âge Glaciaire.

Jean-Claude DUPLESSY



Éruption solaire.

Biologie

Ce qu'il reste à découvrir

John Maddox (traduction C. Antoni-Fort). Éditions Bayard, 2000. (512 pages, 160 francs).

Peu de personnes ont joué un rôle aussi important que John Maddox comme arbitre des modes (scientifiques) et comme faiseur et tuteur de rois ou de fous (scientifiques aussi). Quand il était rédacteur en chef de la revue *Nature*, il a exercé, avec ses collègues et subordonnés, un magistère sévère, acceptant de publier tel article et lui conférant par là même le statut d'une prime à la promotion de ses auteurs, ou le refusant, sans avoir à justifier sa décision. De son mirador, il jugeait la politique

de recherche de tous les pays. Dans ses éditions, il crevait des ballons ou béatifiait. Nul n'était mieux placé que lui pour scruter l'avenir. Qu'en quittant *Nature* il se soit risqué à écrire ce livre, publié il y a deux ans en anglais, rien n'était plus normal ; le témoignage était attendu.

L'édition française dont nous disposons aujourd'hui ne souffre en rien d'avoir deux ans de retard sur l'original : personne ne demandait à J. Maddox que ses prédictions soient réalisées à si court terme ; deux ans de plus ou de moins, qu'importe. Ce qui peut gêner, en revanche, c'est le risque de trahison que fait courir toute traduction à la version originale. Je n'ai pas cette dernière entre les mains et je ne sais donc pas, en relevant quelques perles, si elles sont dues à l'auteur ou au traducteur. Elles sont suffisamment nombreuses et croustillantes pour que je conseille au lecteur de ne pas croire tout ce qui est écrit dans l'ouvrage traduit en français.

Quelques exemples : page 76, la masse du neutron est dite « *a priori* identique à celle du proton » (j'ai peine à croire à cet *a priori*) ; page 117, « un facteur de 10 puissance 38 » est ainsi expliqué : « soit 10 porté 38 fois au carré » ; page 309, les « grands singes » renvoient à une note qui précise que ce sont, outre le chimpanzé, le gorille, l'orang-outan et le babouin (pauvre gibbon...) ; il est également dit que les grands singes sont mieux adaptés pour grimper aux arbres, ce dont on peut douter après avoir vu les films sur les gorilles. Cependant ce n'est certainement pas le traducteur, mais l'auteur, qui place Paris à une altitude de moins de cinq mètres et met la Casille en Laponie, en prévoyant qu'une élévation du niveau des mers de cette hauteur ne laisserait à sec, comme « capitales d'Europe du Nord », que Berlin, Berne, Luxembourg, Vienne et... Madrid.

J'arrête à ce catalogue méchant, mais qui ne porte que sur des aspects secondaires : les vénéniels défauts ne gêneront évidemment que des esprits primaires. En ce qui me concerne, j'ai pris plaisir à la lecture de ce livre, mais je suis déçu par les promesses non tenues du titre. Je n'attendais pas autant de rappels historiques bien présentés, mais sans rapport avec le sujet annoncé, d'Ératosthène à Copernic, Képler ou Galilée, de Hilbert à Newton d'apprendre à Einstein, de Pasteur (à quel sera attribué le « *épérage* » de la « direction » dans laquelle les acides aminés naturels sont asymétriques) à G. J. M. Darwin. En revanche, j'espérais une analyse plus incisive de tout « Ce qu'il nous reste à découvrir », tant en biologie, en astrophysique, en chimie qu'en technologie ou en sociologie.

Ce livre reste à écrire. Pourquoi pas par John Maddox ?

Guy OURISSON

Histoire des sciences

La Chimie charitable et facile en faveur des Dames

Marie Meurdrac. Éditions du CNRS, 1999 (56 pages, 120 francs).

Pour un chimiste, l'ouvrage de Marie Meurdrac est, avant tout, la découverte de ce que les « arts chimiques » étaient au XVII^e siècle.

Conçu comme un manuel de travaux pratiques, il enseigne tout ce qui est nécessaire à la préparation des produits de consommation courante, essentiellement dans les domaines de la santé et de la beauté : matériel, techniques, matières premières, tours de main. Au fil des pages, on apprend ainsi les manières de chauffer, de distiller, de mélanger toutes sortes de produits naturels pour en faire des médicaments ou des cosmétiques.

Cependant, ce petit livre est bien plus qu'un simple recueil technique, car Marie Meurdrac aimait sa « chimie », et elle écrit de façon touchante. Une fois passée la surprise de redécouvrir la langue de Louis XIV ailleurs que chez Molière, on prend beaucoup de plaisir à la lire.

Le livre est divisé en six parties : le matériel et les techniques, les matières premières d'origine végétale (les « simples »), les matières premières d'origine animale, les minéraux, les remèdes et, enfin, « toutes les choses qui peuvent conserver ou augmenter la beauté ».

Dès le premier chapitre, on comprend bien que Marie Meurdrac avait son propre laboratoire, et qu'elle a elle-même expérimenté maintes fois tout ce dont elle parle, surtout lorsqu'il s'agit des opérations effectuées avec le matériel le plus simple possible, bien qu'elle n'ignore pas les derniers perfectionnements techniques, tels les « chaudrons appelés Bains Marie dans lesquels on peut faire plusieurs distillations tout à la fois ».

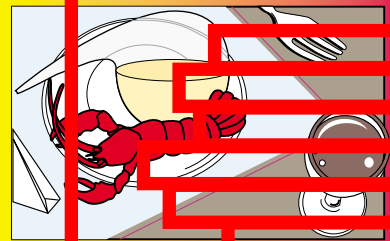
La deuxième partie est très à la mode, puisqu'elle envisage les produits végétaux : vigne, romarin, sauge, aromates et leurs huiles essentielles, eaux distillées de plantes médicinales, de fleurs ou de fruits. Marie Meurdrac donne les modes opératoires (celui de la sublimation du benjoin pour recueillir les « fleurs »

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 26 juin 2000.



POUR LA SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
Tél : 01-55-42-84-00
http://www.pourlascience.com

POUR LA SCIENCE Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger (Rédacteur en chef adjoint), Bénédicte Leclercq (Rédactrice en chef adjointe), Philippe Pajot, Loïc Mangin, Claire Le Poulennec (Rédacteurs), Secrétaire de rédaction : Annie Tacquenot, Pascale Thiollier, Céline Lapert. Site Internet : Cyril Lamotte. Marketing et Publicité : Stéphane Montouchet, assisté de Séverine Mérieux et Christophe Vitello. Direction financière : Anne Gersdorf. Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry. Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Géraldine Le Coz. Presse et communication : Sylvie Gillet, assistée de Lucie Romier. Directeur de la publication et Gérant : Olivier Brossollet.

Ont également collaboré à ce numéro : Leïla Bellon, François Maris Breon, Jean Dalibard, Bettina Debü, Évelyne Host-Platret, Marie-Thérèse Landousy, Catherine Lamblin, Bernard Soumireu-Mourat, Daniel Tacquenot.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors: Michelle Press, Mark Alpert, Carol Ezzell, Wayne Gibbs, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Ricki Rusting, Sarah Simpson, Gary Stix, Philip Yam, Glenn Zorpette. Chairman Emeritus: John Hanley. Chairman: Rolf Grebach. President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraber. Vice-President: Chuck McCullough.

PUBLICITÉ France

Chef de Publicité : Jean-François Guillotin,
jf.guillotin@pourlascience.fr
8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06
Tél. : 01 55 42 84 28
Télécopieur : 01 43 25 18 29

Étranger : 405 Madison Avenue, New York.
N.Y. 10017 - Tél. (212) 754.02.62

SERVICE ABONNEMENTS

Anne-Claire Ternois : 01 55 42 84 04

SERVICE DE VENTE RÉSEAU NMPP

Christophe Vitello : 01 55 42 84 81.

DIFFUSION DE LA BIBLIOTHÈQUE

POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Services : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bâle

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oeies - 1130 Bruxelles.

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

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être 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 de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris). Nos lecteurs trouveront des bulletins d'abonnement en pages 18A, 18B, 98A et 98B.

à l'aide d'une plume au fond d'un cornet en papier donne vraiment envie d'essayer et les indications médicamenteuses des drogues «simples».

C'est la lecture de la troisième partie que l'on risque d'être un peu dérouté. Le chapitre premier traite du sang humain, le deuxième de la poudre de crâne humain et le troisième de l'huile d'os humain. Il faut s'accrocher, on passe ensuite à moins barbare, avec la cire, le miel, le beurre, le lait et l'huile d'œuf.

C'est peut-être dans la quatrième partie, sur les minéraux, qu'il y a le plus de chimie : l'auteur décrit la fabrication des Esprits de Vitriol, de Sel et de Nitre, ainsi que de divers sels métalliques aux noms poétiques : Crocus de Mars ou Vitriol de Vénus.

La cinquième partie, consacrée aux compositions pour la santé, est très agréable à lire. Les recettes sont précises et variées, et l'on reconnaît nombre de plantes familières – fenouil, plantain, chélidoine, marjolaine, mélisse – à côté d'ingrédients plus exotiques, comme dans cette «Eau contre la douleur des oreilles», à base de mastich, d'encens, de myrrhe et de ludnum.

Je ne résiste pas à l'envie de reproduire ici la première phrase de la dernière partie de *La Chymie des Dames*, relative à «des compositions pour l'embellissement du visage» : «J'ai ajouté cette partie à mon Livre en faveur des Dames, pour les garantir d'un nombre infini d'accidents qui arrivent en se mettant des cosmétiques, dont elles ne savent point les compositions.» Marie Meurdrac donne là quelques très intéressantes formules, à commencer par l'Eau de la Reine de Hongrie, dans une version simple, avec uniquement de l'eau-de-vie et du romarin (cette eau redonna tant de beauté à Doña Isabella, âgée de 72 ans, que le roi de Pologne voulut l'épouser !).

Elle est suivie par de nombreuses recettes à base de plantes ou de corps gras, pour traiter le teint ou les rides, pour protéger du soleil, pour rougir les joues et les lèvres, pour blanchir les dents, pour teindre les cheveux en blond ou pour «faire le poil noir». Il est même question d'une pomade pour faire venir les cheveux, à base de graisse de poule, d'huile de chenilles et d'œuf. Cela fait rire, mais qui sait...

La Chymie des Dames est un petit livre très agréable, qui permet d'avoir plaisir en consultant des pages aussi utiles que de rendre visite à Marie Meurdrac, de ne pas l'avoir vue doser ses «scrupules» et ses «pugiles» de matières dans des cornues et des «vaisseaux», au milieu des alambics et des fourneaux.

Alain MEYBECK

Chimie

Food Chemistry

H.D. Belitz et W. Grosch (seconde édition). Éditions Springer, 1999
(1 035 pages, broché : 370 francs, cartonné : 746 francs).

Pour ces ouvrages rassemblent autant d'informations que le livre de H.D. Belitz et W. Grosch, chimistes allemands spécialistes des aliments. On trouve tout, du spectre d'absorption des pigments des fruits rouges aux méthodes d'analyse des protéines alimentaires, de la constitution chimique de l'œuf aux propriétés chimiques détaillées des additifs alimentaires, des courbes de solubilité des diverses molécules aromatiques à la structure physico-chimique du gluten dans la pâte à pain...

Cette dernière évocation appelle un commentaire : la chimie des aliments est-elle possible sans physique ? La réponse est donnée ici : de la physique s'impose, parce que la molécule, dans l'aliment, n'est jamais isolée. Elle intervient autant par ses réactions chimiques, au cours du chauffage, que par ses réactions physiques : dans la mûre qui est cuite, les oses (les «sucres») réagissent avec des acides aminés, engendrant les composés «mélanoidiques» qui font la couleur brune et l'arôme puissant bien connus, mais cette réaction s'accompagne d'une évaporation de l'eau des chairs, l'évaporation qui détermine le déroulement de la réaction précédente, nommée réaction de Maillard.

Depuis de nombreuses années, le livre avait sa place dans tous les laboratoires de sciences de l'aliment, mais les recherches avaient évidemment apporté beaucoup de données nouvelles. Des problèmes scientifiques présentés comme résolus dans la première édition étaient résolus ; des approches, des techniques étaient obsolètes. Une nouvelle édition s'imposait ; elle diffère notablement de la première, en rénovant notablement celle-ci : le travail de remise à jour a été aussi sérieux que l'était le premier document.

Jean RICHERT

La liste de tous les livres reçus en service de presse par la rédaction de *Pour la Science* est donnée sur notre site Internet, à l'adresse : <http://www.pourlascience.com>